



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## OPTOVLÁKNOVÉ BODOVÉ SENZORY

OPTICAL FIBER POINT SENSORS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Okoun

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Urban

BRNO 2016

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Petr Okoun

**ID:** 107470

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Optovláknové bodové senzory

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je posoudit možnosti využití a implementace vybraných optických bodových senzorů v průmyslu. Analyzujte strukturu bodového senzoru s podélnou mřížkou a strukturu s vícenásobnou optickou braggovou mřížkou tvořenou postupnou expozicí přes fázovou masku. Ověřte vybranou strukturu experimentálně.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Editor Eric Udd, William B Spillman. Hoboken: Wiley, c2011, xiii, 498 s. ISBN 978-0-470-12684-4

[2] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[3] BORN, Max a Emil WOLF. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7th exp. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, xxxiii, 952 s. ISBN 05-216-4222-1.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 25.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. František Urban

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce analyzuje strukturu bodových senzorů s podélnou mřížkou a vícenásobnou Braggovou mřížkou a možnostmi využití a implementace bodových optických senzorů v průmyslu. V úvodu práce jsou popsány základní principy šíření světla v optickém prostředí. Následuje popis jevů v optických vláknech a senzorech. Dále je popsáno rozdělení optovláknových senzorů, použití optického vlákna v bodovém režimu a na základě analýzy je navržen optický senzorický systém a je popsána jeho konstrukce. Značná část je věnována rozboru a analýze podélných struktur ve vláknech v návaznosti na vícenásobné Braggovy mřížky, jejich následné výrobě a návrhu využití v senzorice.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

optické vlákno, bodový senzor, DTS senzory, optické vláknové senzory, vícenásobná Braggova mřížka, podélné struktury

## **ABSTRACT**

This diploma thesis analyzes a structure of spot optical sensors with longitudinal grid and multiple Bragg grating and possibilities of spot optical sensors use and implementation in the industry. Basic principles of light propagation through optical environment are described in the introduction part, followed by description of phenomena in optical fibers and sensors. The distribution of fiber optic sensors and the use of optic fiber in spot mode is described further. The optical sensor system is designed on the basis of analysis with description of its construction at the end of this work. A significant part is devoted to the analysis of longitudinal structures in the fiber in response to multiple Bragg gratings, their subsequent manufacture and suggestion of use in sensors industry.

## **KEYWORDS**

optical fiber, spot sensor, DTS sensors, optical fiber sensors, multiple Bragg grating, longitudinal structures

OKOUN, P. *Optovláknové bodové senzory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2016. 59 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. František Urban.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optovláknové bodové senzory“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25. května 2016

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Urbanovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 25. května 2016

.....  
podpis autora

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

Seznam obrázků.....	ix
Úvod .....	1
OPTICKÁ VLÁKNA.....	2
1.1 Světlo a šíření světla v optickém prostředí .....	2
1.1.1 Odraz světla.....	3
1.1.2 Lom světla .....	4
1.1.3 Úplný odraz světla .....	5
1.2 Princip šíření světla optickým vláknem.....	6
1.3 Druhy optických vláken.....	7
1.3.1 Rozdělení optických vláken .....	7
1.3.2 Mnohovidové vlákno .....	8
1.3.3 Gradientní optické vlákno .....	8
1.3.4 Jednovidové vlákno .....	9
1.3.5 Polymerové vlákno – POF .....	9
1.4 Základní parametry optických vláken .....	10
1.4.1 Numerická apertura (NA) .....	10
1.4.2 Disperze.....	11
1.4.3 Útlum světelného signálu v optickém vlákně .....	13
1.4.4 Útlum absorpcí.....	13
1.4.5 Ohyb a jeho vliv na útlum optického vlákna .....	14
2 OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY .....	15
2.1 Rozdělení optovláknových senzorů .....	15
2.2 Bodové senzory teploty .....	15
2.2.1 Senzory založené na modulaci intenzity světla.....	16
2.2.2 Senzory s totálním vnitřním odrazem.....	17
2.2.3 Spektrální optické senzory .....	18
2.2.4 Senzor Fabry-Pérot.....	19
2.3 Distribuované snímání.....	20
2.3.1 DTS – distribuovaný senzor teploty .....	20
2.3.2 DTSS – distribuovaný senzor teploty a tlaku .....	20
2.3.3 DAS – distribuovaný akustický senzor .....	20
3 NÁVRH VLÁKNOVÉHO SENZORU .....	21
3.1 Bodový optovláknový senzor .....	21
4 MŘÍŽKOVÉ OPTICKÉ SENZORY .....	24
4.1 Senzory s Braggovou mřížkou .....	24
4.2 Technologie výroby Braggovy mřížky.....	26
4.2.1 Holografické způsoby zápisu FBG .....	27
4.2.2 Výroba konstantních Braggových mřížek.....	28



4.2.3	Výroba nerovnoměrných Braggových mřížek .....	31
4.2.4	Výroba metodou bod po bodu.....	33
5	STRUKTURY V OPTICKÉM VLÁKNĚ .....	34
5.1	Typy struktur v optickém vlákne .....	34
5.2	Vícenásobná struktura v optickém vlákne .....	36
6	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLÁKNOVÝCH VÍCENÁSOBNÝCH STRUKTUR .....	37
6.1	Příprava mřížek pro měření .....	37
6.2	Měření vícenásobných Braggových mřížek .....	39
6.2.1	Vícenásobná degradovaná kolmá FBG mřížka .....	41
6.2.2	Vícenásobná kolmá FBG mřížka .....	44
6.2.3	Vícenásobná kolmá a nakloněná FBG mřížka .....	49
6.2.4	Aplikace vláknových senzorů s mřížkou .....	55
7	ZÁVĚR .....	56
	Literatura .....	57
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	59

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1.1: Tabulka vlnových délek a frekvencí jednotlivých barev [12] .....	2
Obr. 1.1.2: Odraz světla [13].....	3
Obr. 1.1.3: Lom světla [14] .....	4
Obr. 1.1.4: Úplný odraz světla [15] .....	5
Obr. 1.2.1: Šíření světla optickým vláknem [16] .....	6
Obr. 1.3.1: Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [17] .....	8
Obr. 1.3.2: Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [17] .....	8
Obr. 1.3.3: Jednovidové vlákno [17] .....	9
Obr. 1.4.1: Numerická apertura NA [18] .....	10
Obr. 1.4.2: Vznik vidové disperze [18] .....	11
Obr. 1.4.3: Chromatická disperze [18] .....	12
Obr. 1.4.4: Polarizační vidová disperze [18] .....	12
Obr. 1.4.5: Šíření paprsků v ohybu vlákna se skokovou změnou indexu lomu [18]..	14
Obr. 1.4.6: Mikroohybové ztráty [18].....	14
Obr. 1.4.7: Makroohybové ztráty [18] .....	14
Obr. 2.2.1: Štěrbínový senzor s ohebným zrcadlem [19] .....	16
Obr. 2.2.2: Přenosový senzor založený na štěrbině [19] .....	16
Obr. 2.2.3: Princip jednovláknového reflexního senzoru [5] .....	17
Obr. 2.2.4: Senzor výšky hladiny tekutiny [19].....	17
Obr. 2.2.5: Optický senzor na principu černého tělesa [19] .....	18
Obr. 2.2.6: Optický senzor založený na absorpci materiálu [19].....	18
Obr. 2.2.7: Fluorescenční optický senzor [19] .....	19
Obr. 2.2.8: Princip Fabry-Pérotova senzoru [19] .....	19
Obr. 3.1.1: Bodový senzor s podélnou strukturou a jeho čelní pohled, úhel otočení vlákna 0° .....	21
Obr. 3.1.2: Bodový senzor s podélnou strukturou a jeho čelní pohled, úhel otočení vlákna 90° .....	22
Obr. 3.1.3: Čelní pohled na vlákno s podélnou strukturou, úhel otočení vlákna 45° .	22
Obr. 4.1.1: Princip Braggovy mřížky [5] .....	25
Obr. 4.1.2: Odraz Braggovy mřížky [6] .....	26
Obr. 4.2.1: Princip holografického zápisu mřížky [5].....	27
Obr. 4.2.2: Interferometr se dvěma zrcadly [5] .....	28
Obr. 4.2.3: Lloydův interferometr [5] .....	28

Obr. 4.2.4: Holografický interferometr [5].....	29
Obr. 4.2.5: Princip fázové masky [5].....	30
Obr. 4.2.6: Schéma optické soustavy pro výrobu difrakční mřížky [6] .....	30
Obr. 4.2.7: Poziční závislost rezonanční podmínky rozmítané Braggovské mřížky [5] .....	31
Obr. 4.2.8: Zápis mřížky pomocí aperiodické fázové masky [6].....	32
Obr. 4.2.9: Zápis mřížky pomocí cylindrických čoček [5] .....	32
Obr. 4.2.10: Princip metody bod po bodu [5] .....	33
Obr. 5.1.1: Fázová maska s kolmou strukturou .....	34
Obr. 5.1.2: Fázová maska s nakloněnou strukturou .....	35
Obr. 5.1.3: Fázová maska s podélnou strukturou .....	35
Obr. 5.1.4: Fázová maska s podélnou nakloněnou strukturou.....	35
Obr. 5.2.1: Princip vytvoření vícenásobné struktury ve vlákně .....	36
Obr. 6.1.1: Dvojice hydrogenačních komor.....	37
Obr. 6.1.2: Přípravek s fázovou maskou .....	38
Obr. 6.1.3: Pracoviště pro zápis a měření mřížek.....	39
Obr. 6.2.1: Schéma měřicí soustavy odrazu vícenásobné Braggovy mřížky .....	40
Obr. 6.2.2: Vymazané místo v mřížce po ohřevu horkým vzduchem.....	41
Obr. 6.2.3: Experimentální přípravek k tahovému měření vlákna .....	41
Obr. 6.2.4: Odrazové spektrum degradované kolmé FBG mřížky napnuté silou 0 N	42
Obr. 6.2.5: Odrazové spektrum degradované kolmé FBG mřížky napnuté silou 3 N	42
Obr. 6.2.6: Hodnoty odrazu degradované kolmé FBG mřížky v závislosti na napnutí vlákna .....	43
Obr. 6.2.7: Princip zápisu dvou mřížek mezi sebe.....	44
Obr. 6.2.8: Odrazové spektrum kolmé FBG mřížky .....	44
Obr. 6.2.9: Odrazové spektrum kolmé FBG mřížky napnuté silou 0 N .....	45
Obr. 6.2.10: Odrazové spektrum kolmé FBG mřížky napnuté silou 6 N .....	45
Obr. 6.2.11: Hodnoty odrazu kolmé FBG mřížky v závislosti na napnutí vlákna.....	46
Obr. 6.2.12: Měření odrazu v závislosti na teplotě vlákna .....	46
Obr. 6.2.13: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 90°C.....	47
Obr. 6.2.14: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 110°C.....	47
Obr. 6.2.15: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 130°C.....	47
Obr. 6.2.16: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 150°C.....	48
Obr. 6.2.17: Hodnoty odrazu kolmé FBG mřížky v závislosti na teplotě vlákna.....	48
Obr. 6.2.18: : Princip zápisu kolmé a nakloněné mřížky přes sebe .....	49
Obr. 6.2.19: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 0 N	49

Obr. 6.2.20: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 3 N50	
Obr. 6.2.21: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 4 N50	
Obr. 6.2.22: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 6 N51	
Obr. 6.2.23: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 7 N51	
Obr. 6.2.24: Hodnoty odrazu kolmé a nakloněné FBG mřížky v závislosti na napnutí vlákna .....	52
Obr. 6.2.25: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 90°C .....	52
Obr. 6.2.26: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 110°C .....	53
Obr. 6.2.27: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 130°C .....	53
Obr. 6.2.28: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 150°C .....	53
Obr. 6.2.29: Hodnoty odrazu kolmé a nakloněné FBG mřížky v závislosti na teplotě vlákna .....	54

# ÚVOD

Myšlenka optického přenosu je velmi stará. V minulosti se jednalo o přenos informace prostřednictvím ohně, kouře, přes heliograf až k fotofonu, který v roce 1880 vynalezl Alexander Graham Bell spolu se svým asistentem Charlesem S. Tainterem.

První pokusy s přenosem signálu po optickém vlákně se spadají do roku 1970, kdy útlum optického vlákna dosahoval 20 dB/km. O deset let později již útlum u optického vlákna dosahoval hodnoty okolo 4 dB/km a tato skutečnost výrazně přispěla ke zvýšené vzdálenosti mezi opakovači.

V současnosti je možné dosáhnout útlumu menšího než 0,2 dB/km a vzdálenost mezi koncovými body optického spoje přesahuje 100 km. Optoelektronický přenos informací umožňuje zvýšit kapacitu a rychlost přenosu, nehledě na necitlivost k elektromagnetickému rušení, v porovnání ve své podstatě k dosažené hranici možností přenosu po metalickém vedení.

Optická vlákna patří v dnešní době k přenosovým médiím, umožňují přenášet informace velkými rychlostmi a na dlouhé vzdálenosti. Z mnoha pohledů lze optická vlákna považovat za primární přenosové médium budoucnosti, které postupně nahradí metalická vedení. Je tedy velice důležité umět správně charakterizovat přenosové vlastnosti optického vlákna a také měřit jeho přenosové parametry.

Cílem této diplomové práce je prozkoumat a vyhodnotit možnosti využití a implementace optických bodových senzorů v průmyslu. Následně analyzovat strukturu bodového senzoru s podélnou mřížkou a strukturu s vícenásobnou optickou Braggovou mřížkou, vybranou strukturu ověřit experimentálně.

# OPTICKÁ VLÁKNA

## 1.1 Světlo a šíření světla v optickém prostředí

Jedním z největších objevů fyziky 19. století je poznatek, že světlo je elektromagnetické vlnění. Tato část elektromagnetického vlnění označovaná jako viditelné světlo se nachází v rozmezí vlnových délek 380 - 780 nm. V tomto rozmezí existuje celá řada dalších barev, které jsou charakteristické vlastní vlnovou délkou, tvořících světelné spektrum. Nejkratší vlnová délka má barvu fialovou, nejdelší vlnová délka barvu červenou, viz obr. 1.1.1.

Barva	Vlnová délka	Frekvence
červená	~ 625 až 740 nm	~ 480 až 405 THz
oranžová	~ 590 až 625 nm	~ 510 až 480 THz
žlutá	~ 565 až 590 nm	~ 530 až 510 THz
zelená	~ 520 až 565 nm	~ 580 až 530 THz
azurová	~ 500 až 520 nm	~ 600 až 580 THz
modrá	~ 430 až 500 nm	~ 700 až 600 THz
fialová	~ 380 až 430 nm	~ 790 až 700 THz

Obr. 1.1.1: Tabulka vlnových délek a frekvencí jednotlivých barev [12]

Rychlost světla nebo jiného elektromagnetického vlnění ve vakuu je definována přesnou hodnotou  $c = 299\,792\,458$  m/s, pro většinu výpočtů vystačíme s přibližnou hodnotou  $c \sim 3 \cdot 10^8$  m/s = 300 000 km/s. V látkovém prostředí se světlo šíří vždy menší rychlostí. Pro vzduch platí přibližně stejná rychlost šíření světla jako ve vakuu, ve vodě je rychlost šíření světla cca 225 000 km/s, ve skle je rychlost šíření světla rozdílná podle druhu skla a její velikost se pohybuje od 200 000 km/s (běžné sklo) až do 150 000 km/s (speciální sklo pro optické účely). S měnící se rychlostí světla v látkovém prostředí se mění i jeho vlnová délka, kde  $f$  je frekvence světelného vlnění, viz rovnice 1.1

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

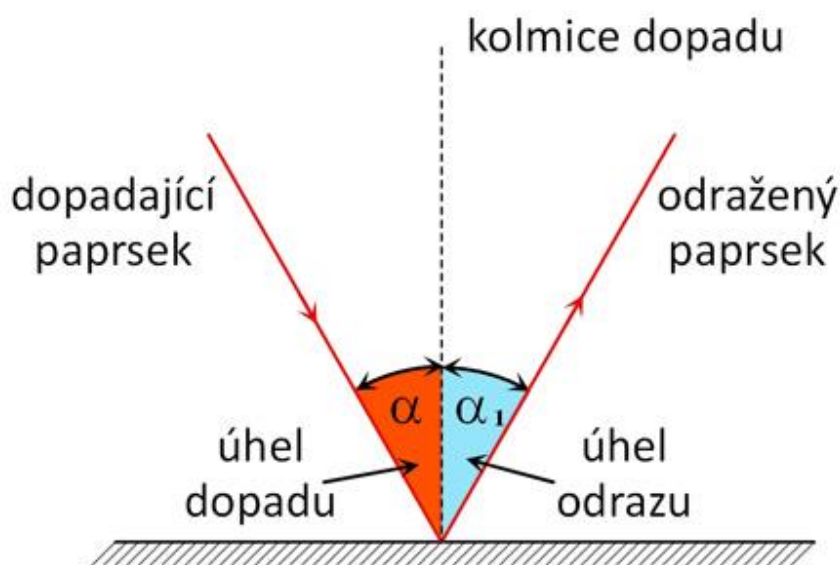
Dopadá-li paprsek světla na rozhraní dvou optických prostředí o různých indexech lomu např. vzduch a sklo, současně se od rozhraní odráží i láme a v každém z těchto prostředí dochází k šíření světla jinou rychlostí. Tento jev na rozhraní dvou prostředí nazýváme odraz a lom světla.

### 1.1.1 Odraz světla

Světelný paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem dopadu  $\alpha$ . Úhel mezi dopadajícím paprskem světla a kolmicí nazýváme úhlem dopadu a označujeme jej  $\alpha$ . Úhel mezi odraženým paprskem světla a kolmicí nazýváme úhlem odrazu a označujeme jej  $\alpha_1$ . Odražené světlo se šíří od rozhraní ve směru, který je určen odraženým paprskem., viz obr. 1.1.2. Vztah mezi úhlem dopadu a úhlem odrazu určuje zákon odrazu světla:

Velikost úhlu odrazu  $\alpha_1$  se rovná velikosti úhlu dopadu  $\alpha$ . Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

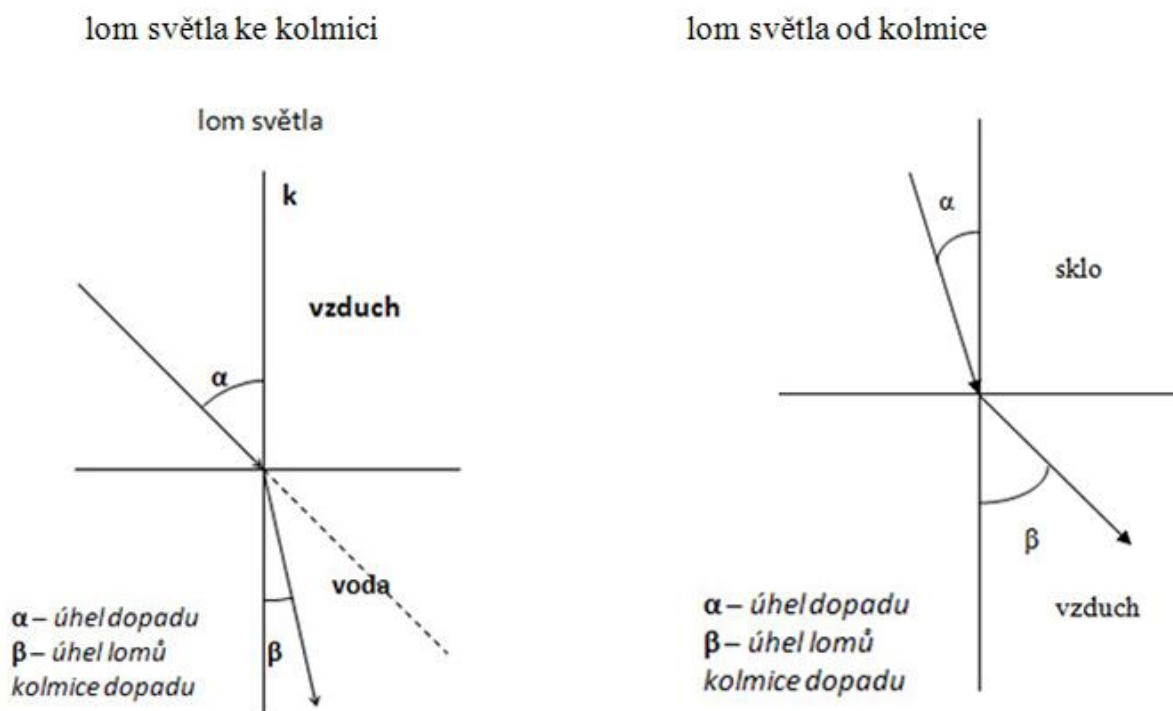
$$\alpha_1 = \alpha$$



Obr. 1.1.2: Odraz světla [13]

### 1.1.2 Lom světla

Dopadá-li paprsek z prostředí s indexem lomu  $n_1$  do prostředí s indexem lomu  $n_2$ , dochází k lomu paprsku. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu. Úhel dopadu značíme  $\alpha$ , úhel lomu značíme  $\beta$ . Lom ke kolmici nastává při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, tzn.  $\beta < \alpha$ . Lom od kolmice nastává při přechodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, tzn.  $\beta > \alpha$ , viz obr. 1.1.3.



Obr. 1.1.3: Lom světla [14]

Index lomu  $n$  je poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v daném prostředí, viz rovnice (1.2).

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

Rychlost světla v látkovém prostředí je menší než rychlost světla ve vakuu, kde  $n_1$  je index lomu prostředí, kterým paprsek prochází a  $n_2$  index lomu prostředí, do kterého paprsek prochází. Z výše uvedené rovnice plyne, že při průchodu světla z vakua do optického prostředí je index lomu vždy větší než 1 ( $n > 1$ ), např. index lomu skla je cca od 1,5 do 2. Pro lom světla platí Snellův zákon lomu:

Podíl sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je roven podílu rychlostí, kterými se světlo šíří v prvním a druhém prostředí. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

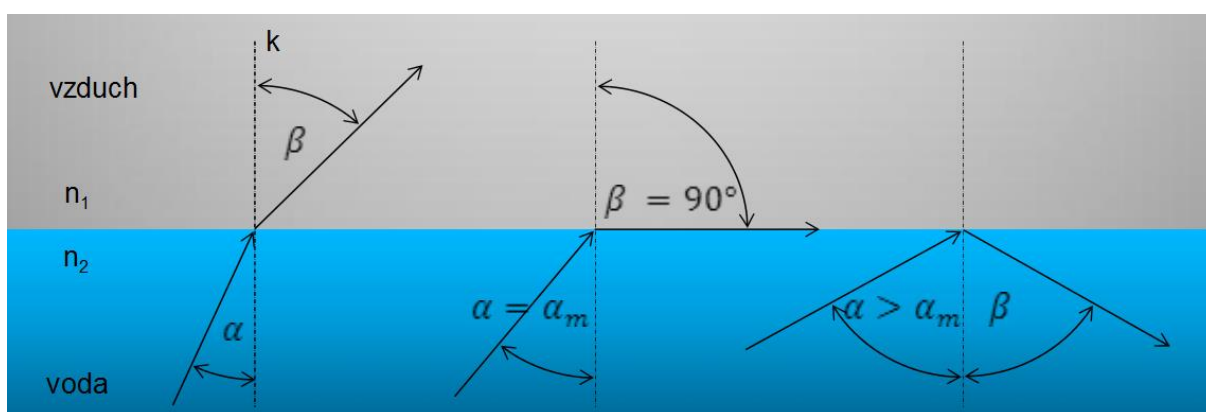


### 1.1.3 Úplný odraz světla

Úplný odraz světla nastává při průchodu světelného paprsku z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího. S rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu a při určitém mezním úhlu dopadu  $\alpha_m$  bude  $\beta = 90^\circ$ . To je maximální úhel, při němž ještě nastává lom světla. Při větším úhlu dopadu ( $\alpha > \alpha_m$ ) lom světla nenastává a světlo se odráží zpět do prostředí opticky hustšího. Nastává úplný odraz světla, viz obr. 1.1.4.

Snellův zákon lomu pro úplný odraz:

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

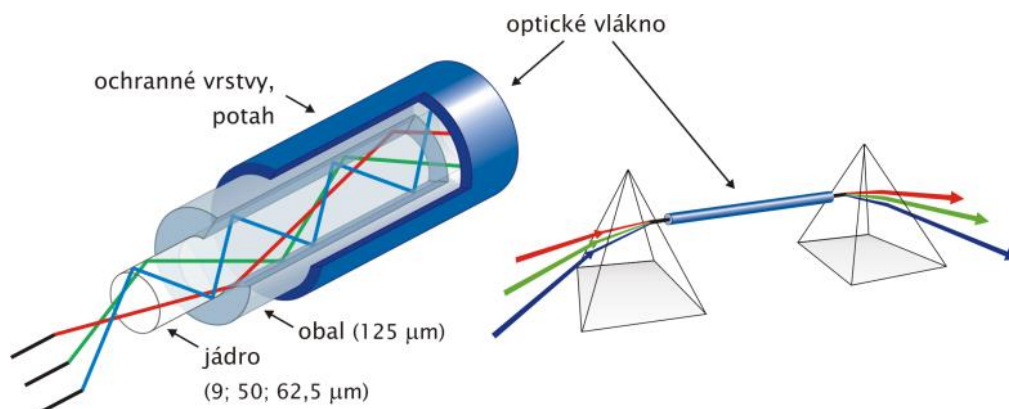


Obr. 1.1.4: Úplný odraz světla [15]

Při mezním úhlu dopadu světelného paprsku na rozhraní skla a vzduchu ( $\alpha_m = 42^\circ$ ), dochází k šíření paprsku po rozhraní. Při úhlu dopadu světelného paprsku ( $\alpha = 45^\circ$ ) dochází k úplnému odrazu světla zpět do prostředí, viz obr. 1.1.4. Tohoto jevu je využíváno při konstrukci optických kabelů, které přenášejí informace prostřednictvím světelných impulzů.

## 1.2 Princip šíření světla optickým vláknem

Šíření světla optickým vláknem je založeno na představě světla jako svazku paprsků. Z vhodného zdroje je světelný paprsek navázán do vlákna a poté je prozkoumána trajektorie každého paprsku od začátku optického vlákna po jeho konec.



Obr. 1.2.1: Šíření světla optickým vláknem [16]

Optické vlákno je skleněné nebo plastové vlákno, které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy. Jedná se defacto o válcový dielektrický vlnovod vyrobený z vhodného materiálu s minimálními ztrátami, např. z křemenného skla. Vláknem tvoří vnitřní jádro, které slouží k přenosu světelných paprsků a je obklopeno vnějším pláštěm (obalem), který má nižší hodnotu indexu lomu než jádro, viz obr. 1.2.1. U paprsků, které dopadají na rozhraní jádra a pláště pod úhlem větším než je mezní úhel, dochází k jejich úplnému odrazu. Tyto paprsky jsou vedeny jádrem a na rozhraní nedochází k jejich lomu. Paprsky, které svírají s osou vlákna menší úhel, než je mezní úhel, se na rozhraní částečně lámou, část přenášeného výkonu se při každém odrazu ztrácí do pláště a tyto paprsky jádro nevede.

Uvažujeme-li světelný paprsek jako úzký svazek několika vidů (dílčích paprsků), pak každý vid, šířící se podél osy vlnovodu, má určitou hodnotu koeficientu šíření a skupinové rychlosti. Vidy si zachovávají své příčné rozložení i polarizaci a šíří se mnohonásobnými odrazy pod určitým úhlem vlnovodem, hovoříme zde o mnohovidovém vlákně. Pokud je průměr jádra dostatečně malý, může se jím šířit pouze jediný vid a hovoříme zde o jednovidovém vlákně.

## 1.3 Druhy optických vláken

Základní třídění optických vláken vychází z konstrukce jádra. Podle průměru jádra a profilu indexu lomu můžeme dělit vlákna na: SI – se skokovou změnou indexu lomu, GI – gradientní a SM – jednovidová. Jednotlivé druhy vláken mají i odlišné parametry. Kromě numerické apertury (která má vztah zejména k navázání optického signálu do vlákna), jsou pak další parametry (útlum a disperze), které omezují přenosové schopnosti optických vláken, zejména v datových komunikačních systémech. Zatímco útlum omezuje velikost přenášeného optického výkonu, disperze omezuje následkem časového rozšiřování přenášených optických impulsů rychlost přenosu dat vláknem.

### 1.3.1 Rozdělení optických vláken

Rozdělit optická vlákna je možné podle několika různých kritérií.

Podle materiálu, ze kterého jsou vlákna vyrobena:

- křemenná
- skleněná
- polymerová (POF)

Podle způsobu použití:

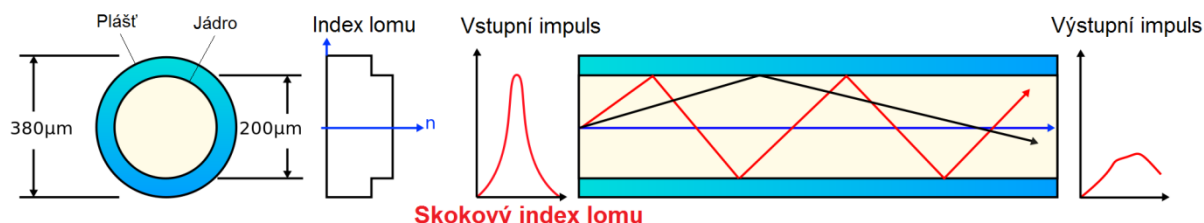
- komunikace
- senzory
- osvětlení (osvětlení objektů v mikroskopech)
- vědecké účely (spektrometrie)

Podle způsobu šíření paprsku:

- mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu
- mnohovidová vlákna s gradientním průběhem indexu lomu
- jednovidová

### 1.3.2 Mnohovidové vlákno

Mnohovidová vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště, jsou výrobně jednoduchá a relativně snadno se konstruují. Nevýhody těchto vláken spočívají ve větším útlumu, disperzi a malé přenosové kapacitě. Vyznačují se většími průměry jádra a pláště, jeho struktura je patrná z obr. 1.3.1.



Obr. 1.3.1: Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [17]

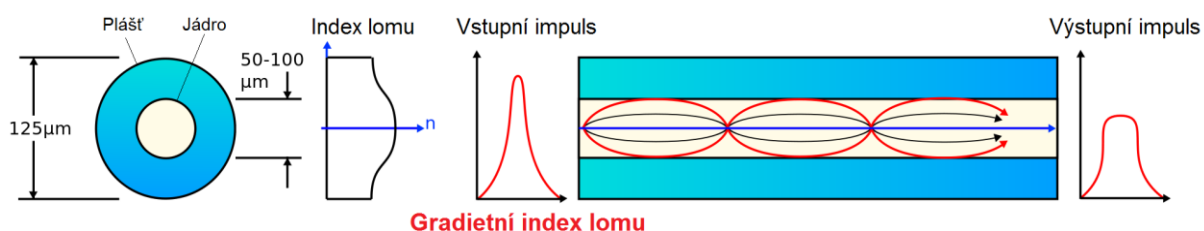
Typický průměr jádra u tohoto typu vlákna je 50/125 μm, 62,5/125 μm s numerickou aperturou NA v rozmezí 0,3–0,6.

Šíření je založeno na úplném odrazu na rozhraní jádro – plášť ( $n_1 > n_2$ ). Standardní vlnová délka je  $\lambda_0 = 850$  nm. Struktura celoskleněného vlákna na obr. 6 může být upravena náhradou pláště a podpůrné struktury plastovým povlakem s  $n < n_1$ , čímž vznikne vlákno PCS (Plastic Clad Silica). Přitom průměr jádra je až 100 až 150 μm. Výhodou je větší NA a nižší cena vlákna, nevýhodou pak je zejména stárnutí pláště, větší ztráty a nižší teplotní odolnost. Vlákno je využíváno pro vlnovou délku 850 nm, šířka přenášeného pásma je 60 Mbit/s.

Tento typ vláken je nejvíce využíván pro spoje na krátké vzdálenosti, nejčastěji pro automatizační účely, krátké přenosy dat, lokální sítě atd.

### 1.3.3 Gradientní optické vlákno

Mnohovidová vlákna s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna, mají menší disperzi a útlum, jsou složitější na výrobu z důvodu speciální úpravy profilu indexu lomu jádra. Na obr. 1.3.2 je zobrazen typický profil tohoto vlákna s průměrem jádra 50 μm, používá se také průměr 62,5 μm,  $NA = 0,18 + 0,24$ . Vlákno je využíváno pro vlnové délky 850 a 1300 nm, šířka přenášeného pásma je 600 Mbit/s.

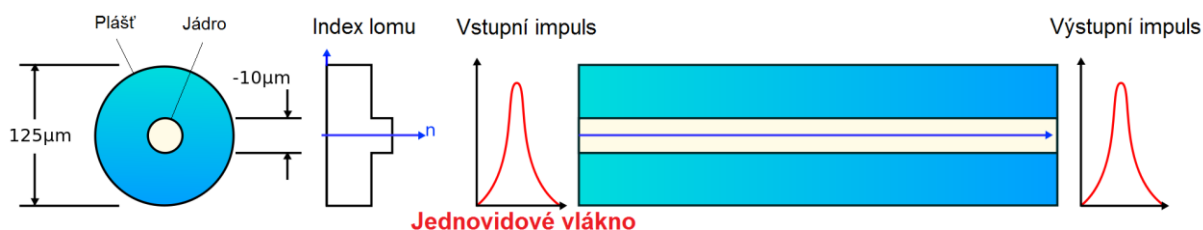


Obr. 1.3.2: Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [17]

Tento typ vláken je nejvíce využíván pro spoje na kratší vzdálenosti, nejčastěji pro telekomunikační účely

### 1.3.4 Jednovidové vlákno

Jednovidová vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště mají velmi malou disperzi, velmi malý útlum a vysokou přenosovou kapacitu. Tímto vláknem se šíří pouze jeden vid a to ve směru jeho osy, viz obr. 1.3.3



Obr. 1.3.3: Jednovidové vlákno [17]

Jednovidové vlákno má průměr jádra 5–10/125 μm, a numerickou aperturu v rozmezí 0,08 – 0,15. S ohledem na numerickou aperturu a problémy s navázáním optického výkonu do jádra, je obvykle poloměr jádra vyšší – 8 μm. Vláknem je využíváno pro vlnovou délku 1550 nm, šířka přenášeného pásma je 10 Gbit/s.

Tento typ vláken je nejvíce využíván pro dálkové přenosy.

### 1.3.5 Polymerové vlákno – POF

Souběžně s tím, jak se rozvíjel přenos prostřednictvím skleněného vlákna, probíhaly pokusy s realizací přenosů po vláknech z plastických hmot. Problém těchto vláken spočíval ale v jejich velkém útlumu. Původně se pohyboval ve stovkách dB/km, v posledních letech se dostáváme k hodnotám až 10 dB/km. Tuto hodnotu lze použít pro síť typu vlákno do domu. Zároveň se podařilo i zvýšit odolnost těchto vláken k teplotě. Soudobá vlákna odolávají hodnotám 200 až 300°C.

Samotné POF vlákno je konstrukčně i přenosově obdobné jako vlákno skleněné. Jádro tvoří polymethylmethacrylát (PMMA) a plášť fluorinated PMMA (fluoropolymer). Index lomu jádra  $n_1 = 1,492$ , pláště  $n_2 = 1,416$ ,  $NA = 0,47$ . V současnosti jsou již vyráběna vlákna o průměru jádra 50, 62,5, 120 μm a pláště o průměru 490 μm.

Vláknem je využíváno pro vlnovou délku 850 a 1300 nm, šířka přenášeného pásma je 1 Gbit/s do vzdálenosti přibližně 200m

## 1.4 Základní parametry optických vláken

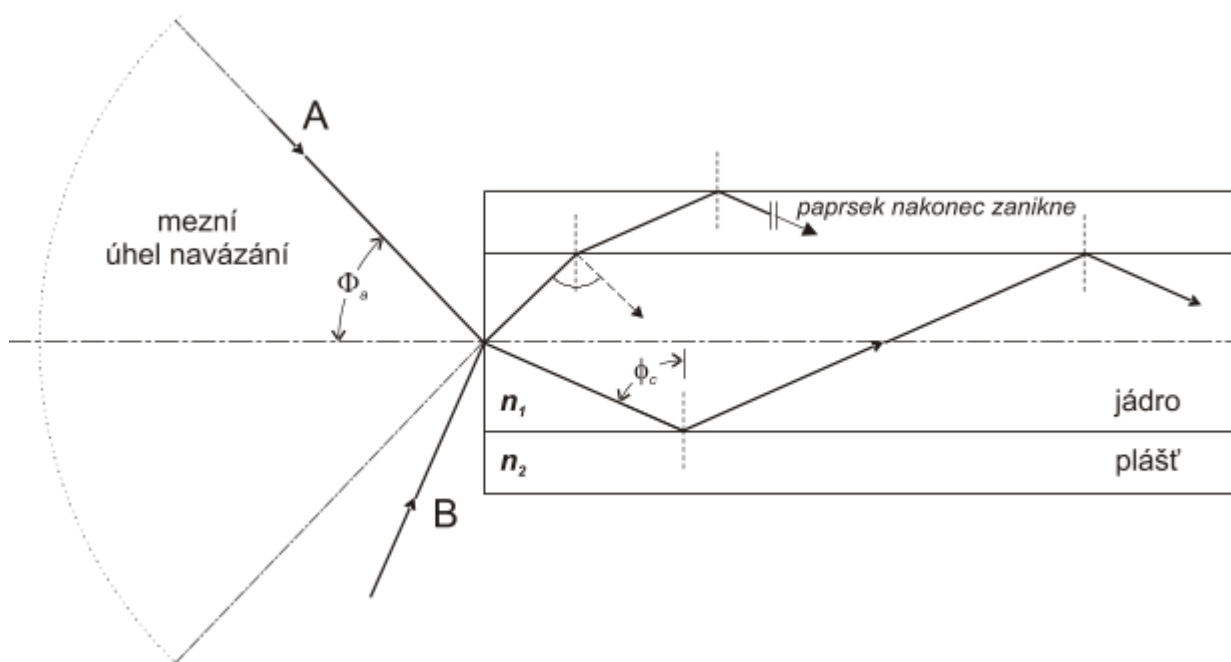
### 1.4.1 Numerická apertura (NA)

Numerická apertura  $NA$ , definuje největší úhel, pod kterým může světelný paprsek vstupovat do optického vlákna, aby jej vlákno přeneslo, viz obr. 1.4.1.

Číselně je  $NA$  rovna sinu maximálního úhlu  $\Phi_a$ , pod kterým se vstupující paprsky budou ještě šířit vláknem. Paprsky, které dopadají pod větším úhlem, se šířit vláknem nebudou. Numerická apertura charakterizuje schopnost vlákna navázat z okolního prostředí do svého jádra optický výkon. Základní podmínkou pro vedení paprsku světlovodem je jeho úplný odraz na rozhraní jádro-plášť. Pokud je překročena velikost mezního úhlu paprsku vzhledem k ose vlákna, paprsek projde do pláště a dojde k jeho vyvázání ven z vlákna.

Velikost  $NA$  u vláken s homogenním jádrem a se skokovou změnou indexu lomu vyjadřuje vztah:

$$NA = n \cdot \sin \Phi_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.5)$$



Obr. 1.4.1: Numerická apertura NA [18]

$n_1$  - index lomu materiálu jádra

$n_2$  - index lomu materiálu pláště

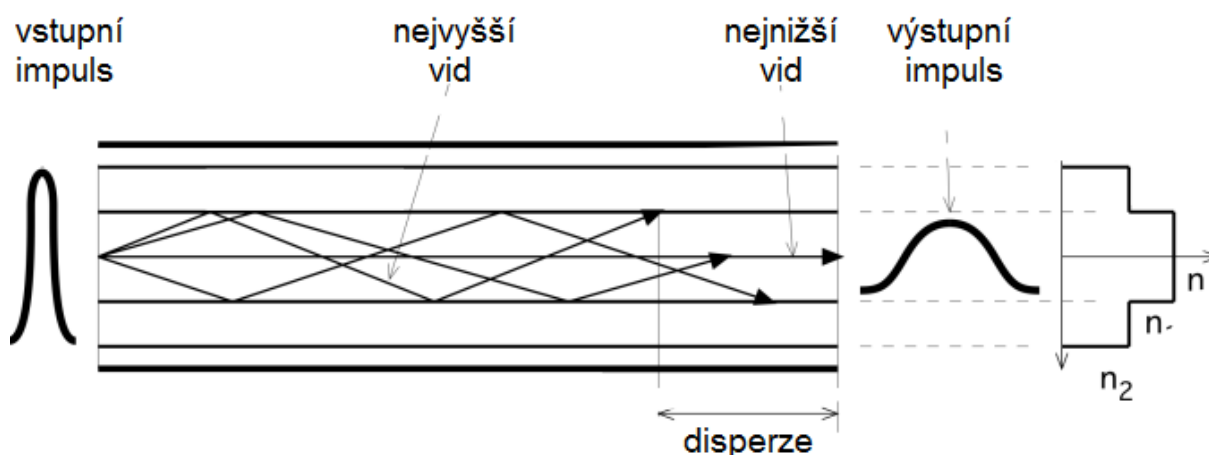
### 1.4.2 Disperze

Disperze patří k nejdůležitějším parametrům optických světlovodů, udává šířku přenášeného pásma a současně i přenosovou rychlost. Disperze je příčinou zkreslení přijímaného signálu a lze ji rozdělit na vidovou, chromatickou a polarizační

#### Vidová disperze

Informace přenášená v mnohovidovém vlákně se šíří různými vidy, které putují po různě dlouhých trajektoriích, proto dochází při přenosu signálu k jeho zkreslení, rozšíření impulsu. Tuto rozdílnou rychlost šíření vidů nazýváme intervídovou disperzí a vyjadřuje převrácenou hodnotu maximální frekvence, kterou lze vláknem přenést, aby bylo možné rozpoznat dva po sobě jdoucí světelné paprsky. Jedná se tedy o přenosovou kapacitu vlákna.

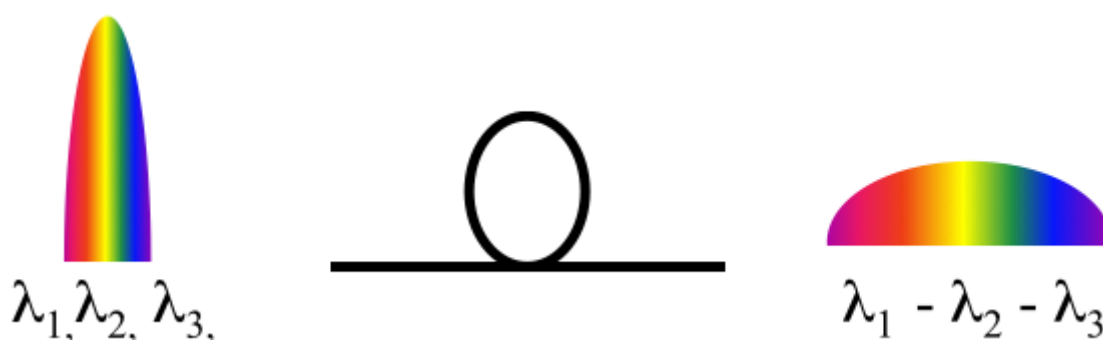
Vidovou disperzi je možné redukovat zmenšením počtu vidů účastnících se přenosu vhodnou volbou konstrukčních parametrů světlovodu, v mezním případě až na jeden vid – jednovidové vlákno. Jiným způsobem snížení vidové disperze je vyrovnaní skupinových rychlostí šíření jednotlivých vidů vhodným uspořádáním vlnovodné struktury – vlákno s proměnným indexem lomu, označované též jako gradientní vlákno. U gradientních vláken roste rychlost šíření vidu s rostoucí vzdáleností od osy vlivem klesajícího indexu lomu. Vidy, procházející osou vlákna pod větším úhlem se pohybují sice po delší trajektorii, ale vyšší rychlostí. Výsledné zkreslení je tedy menší, jednotlivé vidy dorazí na konec vlákna přibližně ve stejném časovém okamžiku, viz obr. 1.4.2.



Obr. 1.4.2: Vznik vidové disperze [18]

## Chromatická disperze

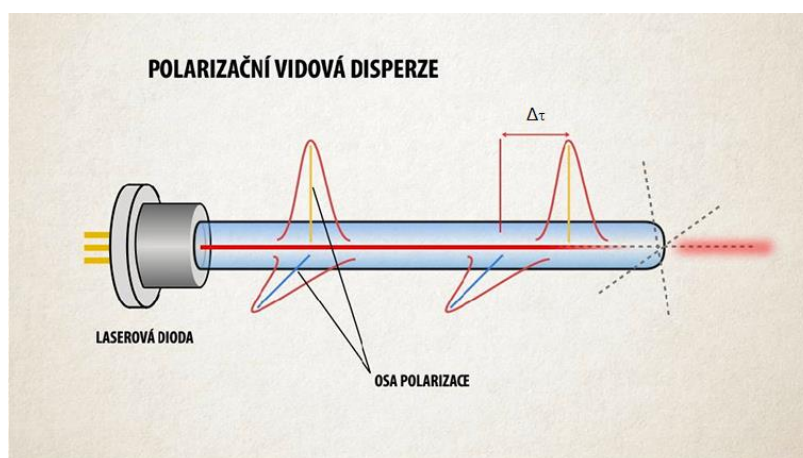
Používané zdroje záření nejsou ideálně monochromatické, ale emitované optické záření obsahuje určité spektrum vlnových délek. Podstata chromatické disperze spočívá v rozdílné rychlosti šíření různých spektrálních složek signálu, na různých vlnových délkách, optickým vláknem. Po vyslání impulsu do vlákna (impuls vždy obsahuje více spektrálních složek), dojde při průchodu vláknem ke zpoždění některých jeho spektrálních složek vůči jiným a impuls se bude při průchodu vláknem časově roztahovat viz obr. 1.4.3, vlnové délky  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  a tím zkreslovat přenášenou informaci. Protože působení disperze omezuje šířku kmitočtového pásma vlákna, bude omezena i vzdálenost, na kterou lze přenášet data. U jednovidových vláken je chromatická disperze v oblasti 1310 nm nulová.



Obr. 1.4.3: Chromatická disperze [18]

## Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze PMD (Polarization Mode Dispersion) se projevuje u jednovidových vláken. Vid, procházející jednovidovým vláknem, se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách, viz obr. 1.4.4. Jakákoliv kruhová nesymetrie vlákna pocházející z výroby, mikroohyby při montáži, nebo vnějším tlakem, způsobí šíření obou polarizací jinou rychlostí. Tato skutečnost může způsobit rozšíření impulsu nebo zkreslení analogového signálu. S růstem přenosové rychlosti nad 2,5 Gb/s může mít tento parametr vliv i na širokopásmové analogové přenosy.



Obr. 1.4.4: Polarizační vidová disperze [18]



### 1.4.3 Útlum světelného signálu v optickém vlákně

Výkon světelného signálu v optickém vlákně se vzdálenosti od zdroje signálu postupně klesá. Útlum optického vlákna je zpravidla udáván v dB/km a je měřítkem ztrát optické energie ve vlákně. Je definován jako poměr vstupního světelného výkonu  $P_1$  a výstupního světelného výkonu  $P_2$  pro danou vlnovou délku  $\lambda$  dle rovnice (1.6):

$$A(\lambda) = 10 \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) [dB] \quad (1.6)$$

Příčinou útlumu světelného signálu v optickém vlákně je absorpce a rozptyl světelných paprsků. Ztráty vznikají přímo v materiálu vlákna, na rozhraní prostředí vlákna, na mikroohybech a makroohybech optického vlákna i při spojování vláken.

Vybrané hodnoty útlumů a jim odpovídající přenesená energie:

- 0,3 dB / km = 93,3% přenesené energie
- 1,0 dB / km = 79,4% přenesené energie
- 3,0 dB / km = 50,1% přenesené energie
- 10,0 dB / km = 10% přenesené energie

Útlum optického vlákna je klíčový parametr při návrhu systému, neboť je limitujícím faktorem pro délku přenosové trasy. Je závislý na vlnové délce, mění se i u téhož vlákna podle využívané vlnové délky. Standardní jednovidové optické vlákno má typický útlum 0.35 dB/km na vlnové délce 1310 nm a 0.21 dB/km na vlnové délce 1550 nm.

### 1.4.4 Útlum absorpcí

Ztráty projevující se v materiálu jádra lze rozdělit na vlastní a nevlastní absorpci a rozptyl v materiálu jádra.

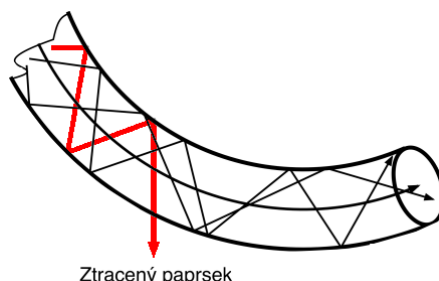
Vlastní absorpce se projevuje pohlcením části optického záření mezi atomární a molekulární strukturou základního materiálu optického vlákna.

Nevlastní absorpce je způsobena pohlcením části světelného záření molekulami nečistot, které pronikly do vlákna při jeho výrobě. Na absorpci se nejvíce podílí přítomností iontů kovů Fe, Cu, Cr a vody v materiálu optického vlákna, vznikající při výrobě, případně špatně provedené vnější ochrany. Pro zajištění nízkého měrného útlumu je nezbytně nutné ve vlákně zajistit co nejnižší koncentraci iontů OH a iontů kovů.

Ztráty rozptylem jsou způsobeny náhodně rozloženými molekulami v amorfním materiálu vytvářející mikronehomogenity indexu lomu materiálu. Jestliže mají tyto nehomogenity a drobné nečistoty malé rozměry vůči vlnové délce, vznikají na nich rozptylové ztráty nazývané Rayleighovy.

### 1.4.5 Ohyb a jeho vliv na útlum optického vlákna

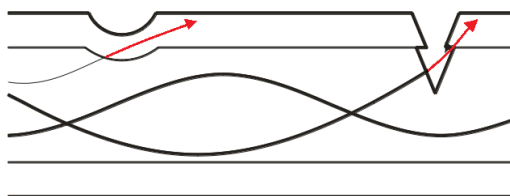
Důležitou vlastností optických vláken je jejich citlivost na ohyb, který se projevuje zvýšeným útlumem vlákna. Při ohybu optického vlákna dochází ke změně úhlů dopadu a odrazu přenášených paprsků. Jestliže některý paprsek překročí mezní hodnotu úhlu odrazu, pronikne do pláště a dojde k jeho vyvázání z jádra vlákna, viz obr.1.4.5. Význam má tento jev z hlediska detekce a lokalizace potenciálních poruch na vlákne. Ohyby můžeme rozdělit na makroohyby a mikroohyby.



Obr. 1.4.5: Šíření paprsků v ohybu vlákna se skokovou změnou indexu lomu [18]

#### Ztráty mikroohyby

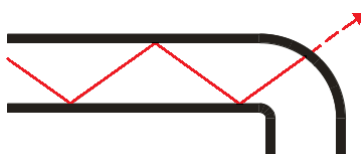
Ztráty mikroohyby, jsou poruchy přímočarosti osy světlovodu a malé chyby v geometrii vlákna. Vznikají při výrobě a také působením okolních elementů, působením okolních elementů na vlákno. Na mikroohybech dochází k odrazu některých vidů odráženy pod velkým úhlem, unikají mimo jádro optického vlákna a dochází tak ke zvětšení jeho útlumu, viz obr. 1.4.6. Vzhledem k tomu, že se mikroohyby vyskytují po celé délce optického vlákna, může dojít k výraznému ovlivnění jeho útlumu.



Obr. 1.4.6: Mikroohybové ztráty [18]

#### Ztráty makroohyby

Ztráty makroohyby vznikají běžně při práci s optickými vlákny, např. v optických rozvaděčích a spojkách, kde je třeba dbát na průměr ohybu vláknových rezerv. Dojde-li k ohybu vlákna přesahující určitou mez, může tento ohyb způsobit vyvázání paprsku z vlákna, viz obr.1.4.7 a tím zvýšit útlum. Vláknové trasy by nemělo být nikde vystaveno ohybu o menším průměru než 60 mm.



Obr. 1.4.7: Makroohybové ztráty [18]

## 2 OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY

Současný dynamický rozvoj technologie optických vláken má úzkou souvislost s využitím optických součástí a zvláště optických vláken v oblasti telekomunikací. Podíváme-li se do historie první náznaky o vývoji a použití nízkoútlumových optických vláken sahají do šedesátých let 20. století. S postupným vývojem technologie v následujících letech bylo možné použít získané znalosti pro výrobu senzorů z optických vláken. S jejich výrobou došlo k rychlému rozšíření a následnému vývoji různých typů pro různé aplikace.

### 2.1 Rozdělení optovláknových senzorů

Základní kritéria rozdělení senzorů:

- senzory, u kterých je vlákno využito k přenosu informace
- senzory, u kterých je vlákno využito jako detektor

Prostorového uspořádání:

- bodové senzory
- distribuované (rozprostřené) senzory
- semi-distribuované (polo-rozprostřené) senzory

Dále je možné optovláknové senzory rozdělit podle použité technologie nebo uvažované oblasti použití. V současné době je možné měřit různé fyzikální veličiny, např. teplotu, tlak, deformace, statické i dynamické mechanické napětí, posuv, deformace, vibrace nebo elektrický proud. Chemické a biochemické senzory jsou využívány k měření parciálního tlaku kyslíku.

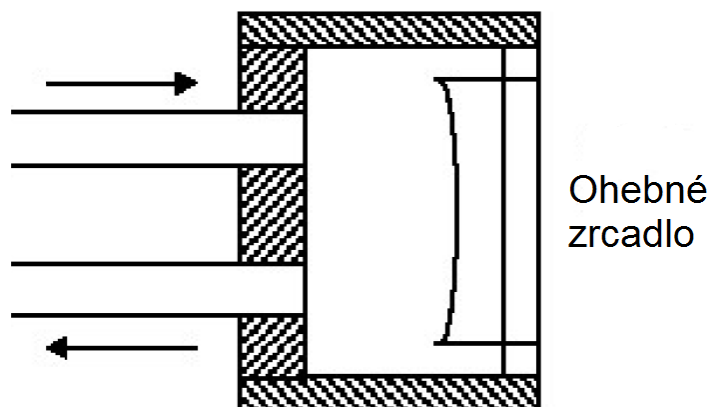
### 2.2 Bodové senzory teploty

Optovláknové senzory se rozlišují na vlastní, kde teplota ovlivňuje přímo vlastnosti optického vlákna a nevlastní kde optické vlákno pouze plní funkci transportního prostředí. Podle zapojení jsou děleny na pasivní, světelná energie zabezpečuje jak měření teploty, tak i přenos informace a napájené elektricky, světelná energie se přeměňuje na elektrickou energii napájející snímač a zpět se mění na světelnou energii nesoucí informaci o měřené teplotě.

Teplota působící na optické vlákno vyvolává změny jeho optických vlastností. Nejčastěji jsou optické vláknové snímače založeny na generátorovém principu na spektrálně závislé absorpci a fluorescenci, dilataci, dozívání fluorescence v čase, na závislosti indexu lomu, dvojlomu a rozptylu záření.

### 2.2.1 Senzory založené na modulaci intenzity světla

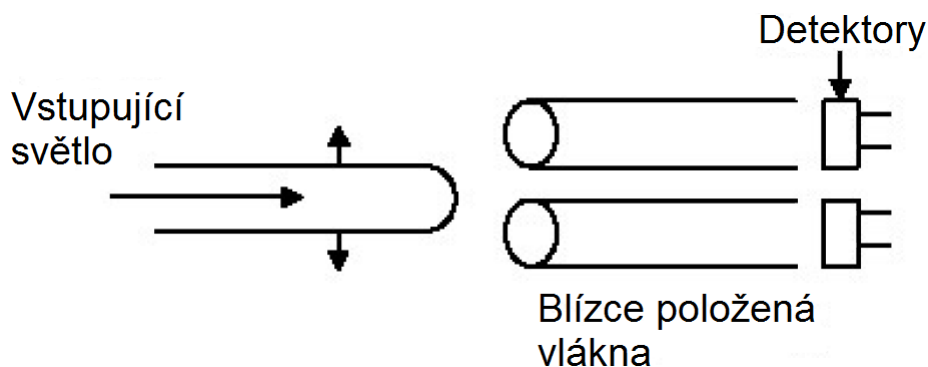
Příkladem senzoru, který je založen na modulaci intenzity světla, je štěrbinový senzor s ohebným zrcadlem, viz obr. 2.2.1. Princip konstrukce spočívá v ohebném zrcadle, reagující na vnější podněty, např. tlak. Při posouvání pozice zrcadla, dochází k posouvání efektivní vzdálenosti mezi ním a optickými vlákny, jehož výsledkem je změna výsledné modulační intenzity světla. Tento typ senzorů je nejčastěji využíván pro měření vibrací a malých deformací.



Obr. 2.2.1: Štěrbínový senzor s ohebným zrcadlem [19]

### Přenosový štěrbinový senzor

Přenosový senzor založený na štěrbině využívá poměru výstupů na detektorech pro lokalizaci pozice vstupního vlákna, viz obr. 2.2.2.

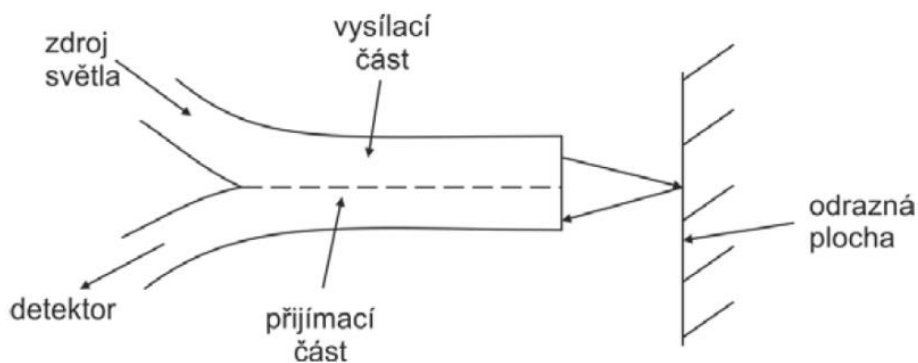


Obr. 2.2.2: Přenosový senzor založený na štěrbině [19]

## 2.2.2 Senzory s totálním vnitřním odrazem

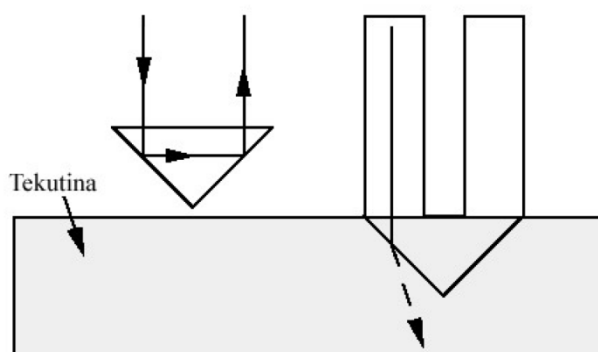
### Jednovláknový reflexní senzor

Senzor tvoří dva svazky optických vláken nebo jeden pár optických vláken, viz obr 2.2.3. Jedním svazkem je paprsek přenášen vláknem k odraznému místu a druhým svazkem je odražený paprsek zachytáván a přenášen k detektoru. Intenzita zachyceného světla je závislá na vzdálenosti mezi sondou a odrazným místem.



Obr. 2.2.3: Princip jednovláknového reflexního senzoru [5]

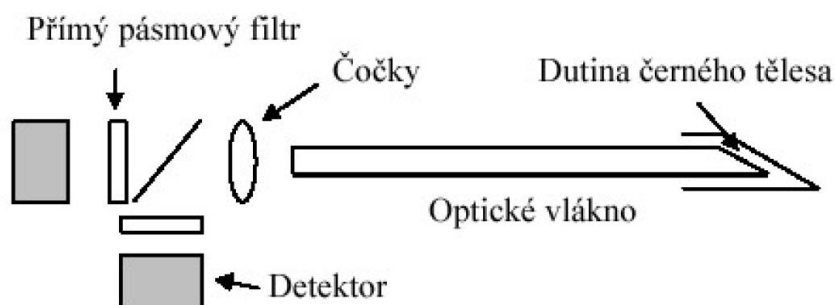
Senzor lze využít např. pro měření hladiny tekutiny, viz obr. 2.2.4. Jestliže tekutina vystoupá k odrazovému hranolu, změní se index lomu na rozhraní hranolu a tekutiny. Část světelných paprsků pronikne do tekutiny a odražený signál je slabší. Přesnost měření dosahuje 1-10%. Senzor na tomto principu lze využít pro měření tlaku nebo změny indexu lomu v gelech či tekutinách.



Obr. 2.2.4: Senzor výšky hladiny tekutiny [19]

### 2.2.3 Spektrální optické senzory

Nejjednodušším typem spektrálního optického senzoru je senzor na principu záření černého tělesa, viz obr. 2.2.5. Na konci optického vlákna je umístěna dutina černého tělesa. Jestliže dutina zvýší svoji teplotu, začne se chovat jako generátor světla.

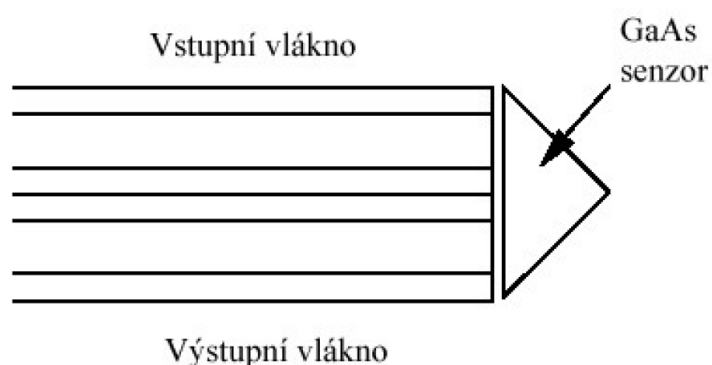


Obr. 2.2.5: Optický senzor na principu černého tělesa [19]

Detektor spolu s přímým pásmovým filtrem určuje profil křivky černého tělesa v závislosti na teplotě. Pokud je teplota přehřátého místa nižší než 200°C, klesá přesnost tohoto senzoru. Samotné optické vlákno nesmí být přehřáté, tou musí být vždy dutina černého tělesa. V opačném případě by mohlo dojít k porušení integrity signálu. Největší efektivitu dosahuje tento senzor při měření teploty přehřátého místa nejméně 300°C a vyšší.

### Absorpční senzor

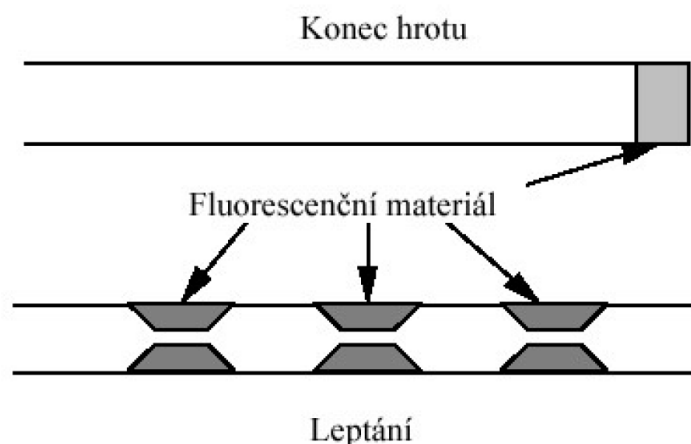
Jiným druhem senzoru, který měří teplotu, je senzor založený na absorpci, viz obr. 2.2.6. Zde je využito vstupního a výstupního páru optického vlákna, kterými na senzor GaAs dopadá paprsek z širokopásmového zdroje světla. Rychlost poklesu fluorescence je funkcí teploty, čehož tento princip využívá.



Obr. 2.2.6: Optický senzor založený na absorpci materiálu [19]

## Fluorescenční senzory

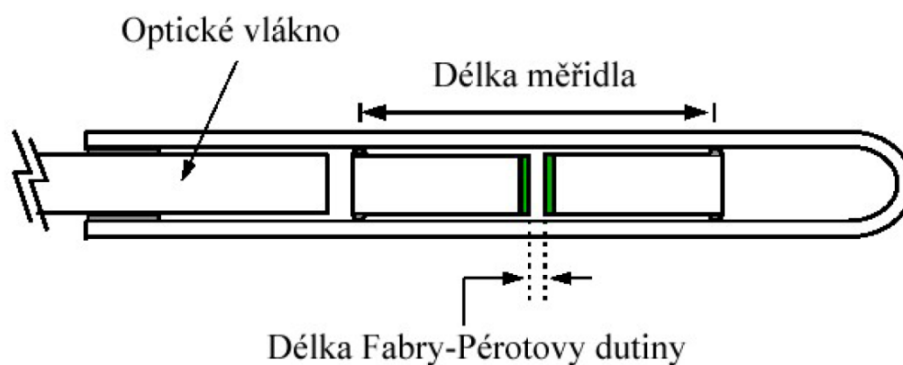
Na obr. 2.2.7 jsou zachyceny dva nejpoužívanější fluorescenční senzory. Světlo se šíří vláknem a koncovým hrotem senzoru k sondě z fluorescenčního materiálu. Zachycený výsledný fluorescenční signál putuje stejným vláknem zpět na výstup demodulátoru. Senzory lze využít pro měření fyzikálních parametrů, stejně tak jako pro měření přítomnosti chemických prvků.



Obr. 2.2.7: Fluorescenční optický senzor [19]

### 2.2.4 Senzor Fabry-Pérot

Tyto senzory tvoří dvě odrazecí zrcadla, tvořící Fabry-Pérotovu dutinu, viz obr. 2.2.8. Princip interferometrických senzorů je založen na skládání dvou odrazů a následné změny intenzity v detektoru. Funkce sinus, která se mění, pak reprezentuje vzdálenost těchto dvou zrcadel. Deformace a teplota přímo ovlivňují délku. Zrcadla lze realizovat povlakem odrazivého materiálu uvnitř vlákna, případně je možné vytvořit strukturu Braggovy mřížky uvnitř optického vlákna.



Obr. 2.2.8: Princip Fabry-Pérotova senzoru [19]

## **2.3 Distribuované snímání**

### **2.3.1 DTS – distribuovaný senzor teploty**

Distribuovaný senzor teploty je optovláknový distribuovaný systém měřící kontinuálně teplotu podél optického vlákna v několika tisících bodech současně. DTS po zpracování poskytuje informace o teplotním profilu v okolí měřeného optického vlákna. Systém je založen na metodě OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) a využívá Ramanova nebo Brillouinova stimulovaného rozptylu. Tyto měřicí techniky spočívají v měření intenzity rozptylového světla, které je způsobeno teplotně ovlivněnými vibracemi molekul. Technologie DTS je využívána např. v tunelech jako lineární požární systém, v geotechnice, monitoringu produktovodů, atd.

### **2.3.2 DTSS – distribuovaný senzor teploty a tlaku**

Brillouinův rozptyl vzniká jako výsledek interakce šířícího se optického signálu a teplotně akustických vln. Tyto vlny jsou přítomny v křemenném vlákne a umožňují vznik frekvenčně posunutých složek. Výsledkem toho je Brillouinův frekvenční posuv, nesoucí lokální informaci o teplotě a mechanickém namáhání vlákna. Tyto měřicí techniky spočívají v měření vlnové délky světla, resp. jeho frekvence. Měření založená na Brillouinovu jevu je mnohem přesnější a stabilnější, využití DTSS technologie spadá především do oblasti stavebnictví geotechniky.

### **2.3.3 DAS – distribuovaný akustický senzor**

Rayleighův rozptyl úzce souvisí s Ramanovým rozptylem. Při Rayleighově rozptylu se frekvence záření nemění, při Ramanově rozptylu je frekvence dopadajícího a rozptýleného záření různá. Jakákoliv zvuková aktivita vytváří akustickou energii, kterou absorbují molekuly v jádře vlákna, čímž dochází k vytvoření fázového posuvu v rozptýleném světle. DAS senzor umožňuje detekovat zvuk podél optického vlákna, typické využití DAS technologie je především v zabezpečovací technice a v oblasti železniční dopravy. Jako detekční vlákna jsou využívána jednovláknová optická vlákna.

Celý DTS je založen na principu optického reflektometru. Do vlákna je vyslán světelný impulz, jehož část se vlivem nelineárních jevů (Ramanova nebo Brillouinova) ve vlákne vrací na detektor. Po oddělení složek, které nenesou informace o teplotě, je určitá část světla využita k určení teploty. Lokalizace místa, kde ke změření teploty došlo, je stejná jako v případě reflektometru, tj. na základě informace o čase, za jaký se světlo z určitého bodu vrátilo.



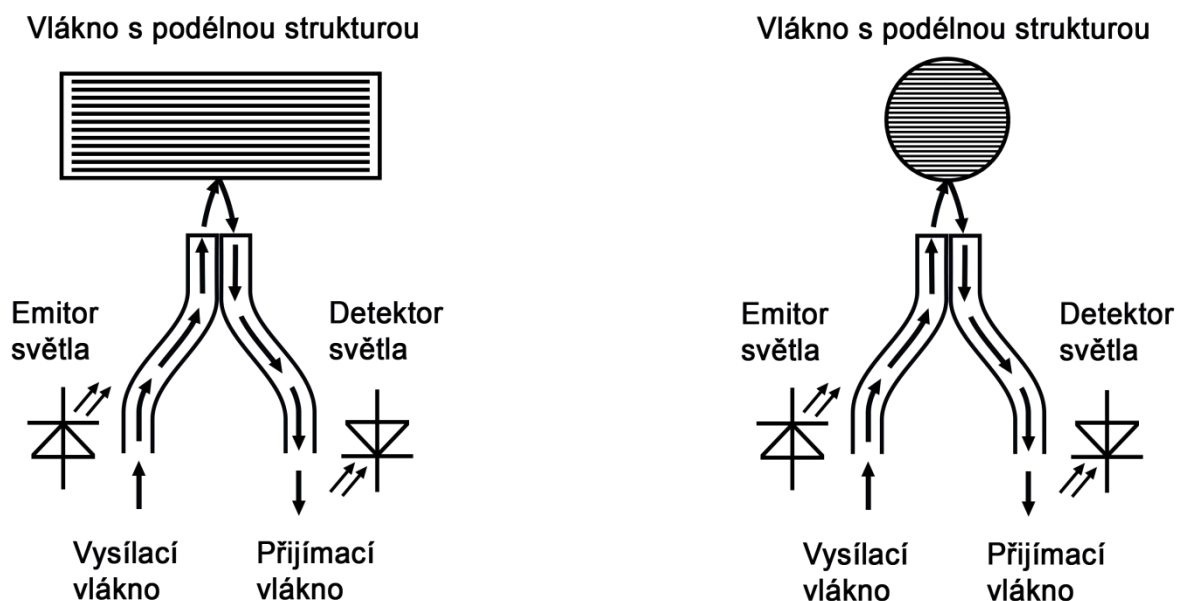
# 3 NÁVRH VLÁKNOVÉHO SENZORU

## 3.1 Bodový optovláknový senzor

Základem návrhu bodového optovláknového senzoru je vlákno s podélnou strukturou. Tato struktura je vytvořena vystavením optického vlákna expozici koherentním UV svazkem přes fázovou masku

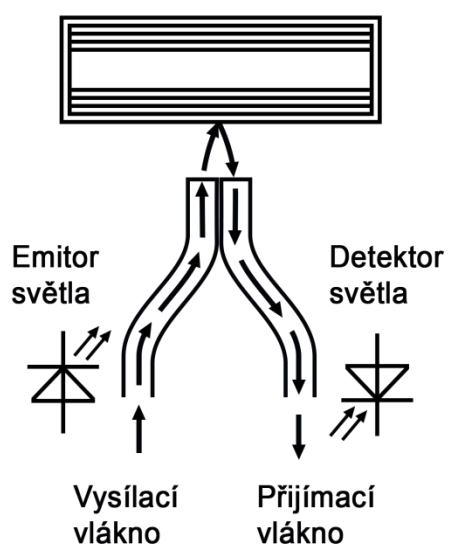
Senzor je tvořen jedním párem optických vláken (vysílací a přijímací vlákno) a vláknem s podélnou strukturou. Levým vláknem je emitorem světla (laserová dioda vlnové délky 1550 nm) vyslán světelný impuls. U tohoto impulsu dochází po vyvázání z vlákna k odrazu od podélné struktury ve vlákně a opětovnému navázání do pravého vlákna, zakončeného detektorem, viz obr 3.1.1. Intenzita zachyceného světla je závislá na natočení vlákna s podélnou strukturou vůči vysílacímu a přijímacímu vláknu.

Vysílací a přijímací vlákno bylo navrženo jako jednovidové, průměr jádra 9  $\mu\text{m}$ . Pro samotný senzor bylo zvoleno mnohovidové vlákno o průměru 50  $\mu\text{m}$ , kde lze předpokládat spolehlivé vytvoření podélné struktury.

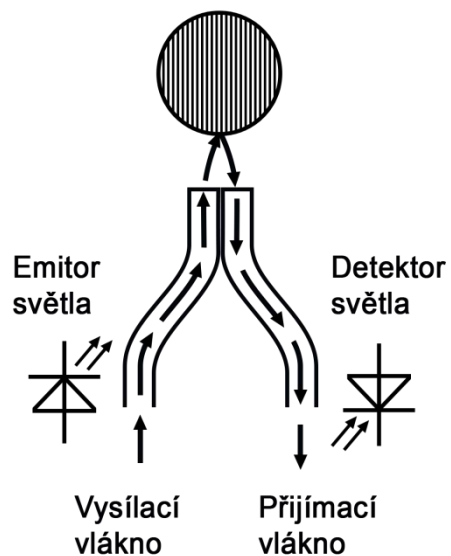


Obr. 3.1.1: Bodový senzor s podélnou strukturou a jeho čelní pohled, úhel otočení vlákna 0°

Vlákno s podélnou strukturou

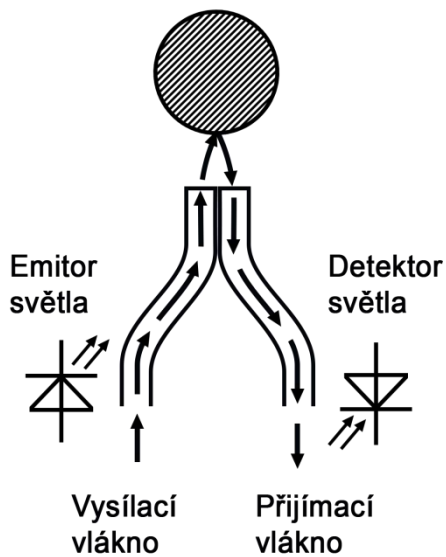


Vlákno s podélnou strukturou



Obr. 3.1.2: Bodový senzor s podélnou strukturou a jeho čelní pohled, úhel otočení vlákna 90°

Vlákno s podélnou strukturou



Obr. 3.1.3: Čelní pohled na vlákno s podélnou strukturou, úhel otočení vlákna 45°

Navržený senzor lze využít v průmyslu jako snímač otáček. Vlivem otáčení vlákna dochází k pohybu minima na vlnové délce. Tato minima lze snímat detektorem a následně vyhodnotit. Tímto způsobem je možné získat informaci o počtu otáček. Senzor lze rovněž využít např. k detekci polohy hřídele podle intenzity odraženého světla v závislosti na aktuálním natočení vlákna.

V některých případech není možné instalovat běžné měřicí senzory. Jedná se zejména o prostředí výbušné, vznětlivé či silně elektromagneticky rušené. Typickým nasazením navrženého senzoru by mohla být oblast energetiky (měření polohy a otáček hřídele vodní turbíny nebo větrné elektrárny), nebo průmyslová výroba (měření posuvu válečkového dopravníku).

## 4 MŘÍŽKOVÉ OPTICKÉ SENZORY

Struktury s optickými mřížkami jsou využívány ve velké řadě aplikací s vysokým technickým i ekonomickým potenciálem. Mřížkování v optických vláknech je pravděpodobně nejrozšířeněji používaná struktura uvnitř vláken pro telekomunikační i senzorové účely.

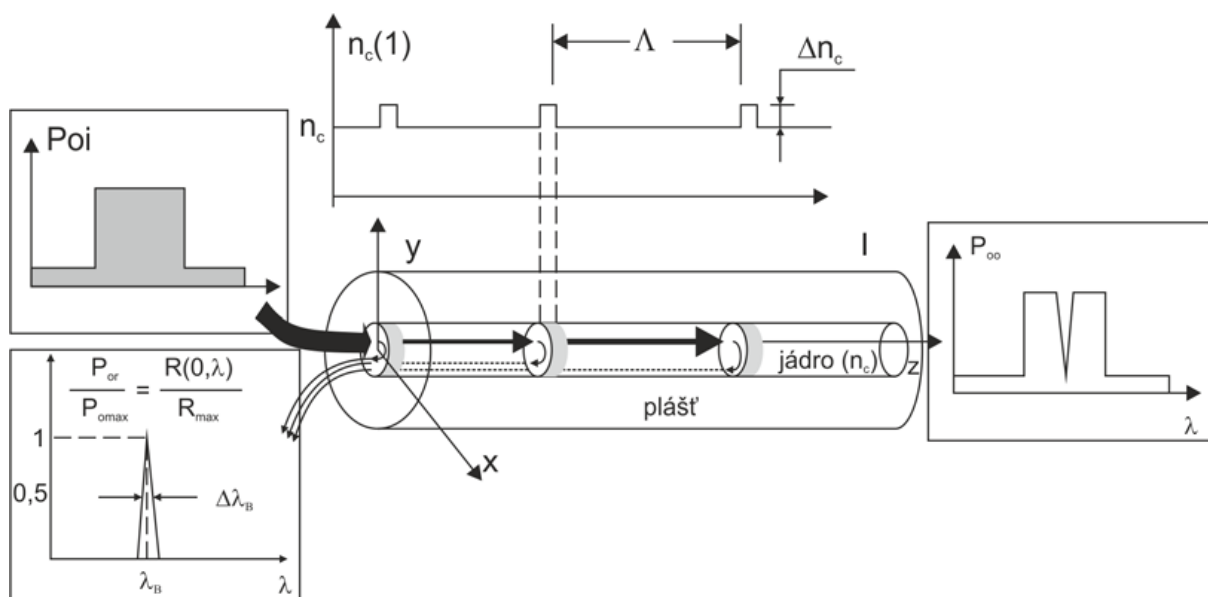
Největší přínos mají jako vláknově optické snímače v senzorové oblasti. Z tohoto důvodu je na ně kladena celá řada technických a funkčních požadavků, jako je vlnově zakódovaná odezva, přenosová nebo odrazová filtrace, lineární výstup, vysoká citlivost, velký dynamický rozsah, in-line optické připojení, kompatibilita s vláknově optickými sítěmi, necitlivost na elektromagnetické rušení, flexibilní velikost od 0,1 mm až po několik cm, robustnost, stabilita, odolnost po dlouhou dobu, snadnost výroby, atd.

Obecně lze vláknové mřížky rozdělit na mřížky s krátkou periodou a mřížky s dlouhou periodou. Mřížky s krátkou periodou, častěji označovány jako Braggovské mřížky, mají periodu do 1  $\mu\text{m}$ , mřížky s dlouhou periodou do 100 – 500  $\mu\text{m}$ . [5]

### 4.1 Senzory s Braggovou mřížkou

Senzory s Braggovou mřížkou jsou tvořeny difrakční strukturou zapsanou pomocí UV laseru uvnitř optického vlákna. V jádře vlákna je vytvořena mřížka, představovaná střídající se oblastí s indexem ( $n_c + \Delta n_c$ ) a periodou  $\Lambda$ , kterou následuje oblast s indexem lomu  $n_c$ . Při průchodu optického paprsku  $P_{oi}$  vláknem dochází k vzájemné interferenci světelné vlny s mřížkou, část dopadajícího světla je rozptýlena kvůli změně indexu lomu  $\Delta n_c$ . Paprsek procházející vláknem dopadá na tuto podélně modulovanou strukturu indexu lomu, která může vlnu částečně nebo úplně odrážet, nebo kterou může vlna částečně nebo úplně procházet. Odraz nebo průchod vlny závisí na složení optického záření z vlnových délek, které interferují na periodické struktuře mřížky [16]. Za předpokladu, že prostorová perioda indexových změn mřížky je rovna polovině délky vlny světla ve vlákně (nebo celistvému násobku), optické záření dopadající na mřížku je odraženo (Braggovská vlnová délka  $\lambda_B$ ) a šíří se ve vlákně zpětným směrem. Tento jev je označován jako Braggova podmínka odrazu. Energie nesená tímto videm je určena integrací rozptýleného záření o vlnové délce  $\lambda_B$ , označena jako  $P_{or}$ . [5] Zbývající optická energie  $P_{\infty}$  je přenesena v dopředném směru, viz obr. 4.1.1.

K odrazu dochází jenom při splnění předchozí podmínky a pouze ve velmi úzkém okolí Braggovy frekvence. Pokud je vlnová délka světla mimo Braggovu frekvenci, odraz nenastává vůbec, případně je zcela minimální, pak hovoříme o postranních lalocích. [8] Nejčastěji je využíváno vlnové délky v pásmu 1510 - 1590 nm.



Obr. 4.1.1: Princip Braggovy mřížky [5]

Špička odraženého spektra, mající hodnotu rezonanční vlnové délky  $\lambda_B$  vychází ze vztahu pro Braggovu podmínku odrazu:

Braggova podmínka odrazu:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.7)$$

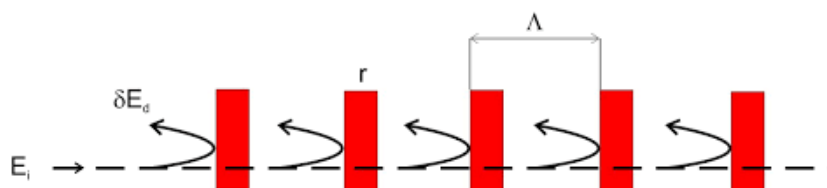
- $\lambda_B$  — odražená vlnová délka
- $n_{eff}$  — efektivní index lomu
- $\Lambda$  — perioda mřížky

Ve vztahu (1.7) vyjadřuje  $n_{eff}$  efektivní index lomu. Měření vlnové délky špičky odraženého záření pak tedy odpovídá přímému měření optické periody mřížky  $n_{eff}\Lambda$ . Při jakémkoliv narušení, které mění hodnotu  $n_{eff}$  a periodu mřížky  $\Lambda$ , případně obě hodnoty současně, dojde ke změně měřené Braggovské vlnové délky. [5]

Délka mřížky se pohybuje rozmezí desetin milimetru až po desítky centimetrů. Jestliže je vlákno vystaveno změně teploty nebo mechanickému namáhání, dojde současně ke změně periody mřížky a odrazu světla jiné vlnové délky. Po zkalibrování lze měřit teplotu, přeneseně tlak, vibrace a jiné veličiny. FBG technologie umožňuje sdružovat jednotlivé senzory do řetězků, nebo spojit do série či přes dělič paralelně více senzorů. Výběr optimalizovaných mřížek pro různé vlnové délky v pásmu 1510 - 1590 nm, umožní jejich současné sledování. Počet sledovaných mřížek na jednom kanále závisí na velikosti měřicího rozsahu, požadovaného pro měřenou veličinu. V uvažovaném pásmu 1510–1590 nm, činí rozsah 80 nm. Pokud bude posun

vlnových délek  $\pm 4$  nm od středové hodnoty a 1 nm je ponechán na oddělení pásem dvou senzorů se sousední vlnovou délkou, pak je možné na jednom kanále sledovat současně až 8 senzorů. Jestliže bude zvolen posun od středové vlnové délky pouze  $\pm 2$  nm, pak jich lze sledovat dvojnásobný počet [19].

Z Braggovy podmínky odrazu vyplývá, že je nezbytné, aby se odrazy postupujících vln od jednotlivých míst se změnami indexu lomu v mřížce vzájemně sčítaly. Dle literatury [6] platí, že částečný odraz od následujícího místa změny indexu lomu musí dorazit k předchozímu místu se změnou indexu lomu v mřížce v přesně stejné fázi, jakou má odraz vlny od této předchozí indexové změny. Jestliže bude měřeno fázové zpoždění mezi předchozí a následující částečně odraženou vlnou ve stejném místě, pak toto zpoždění musí být rovno 0 rad, nebo celistvému násobku  $2\pi$ , viz obr. 4.1.2. [8]



Obr. 4.1.2: Odraz Braggovy mřížky [6]

## 4.2 Technologie výroby Braggovy mřížky

Výroba Braggovy mřížky, je podmíněna změnou indexu lomu ve vlákne. Periodická narušení se vytváří ve struktuře díky jevu zvanému fotosenzitivita, umožňující vytvoření trvalé změny indexu lomu v jádře vlákna. Požadovaných struktur se změnami indexů lomu je docíleno expozicí fotosenzitivního vlákna UV zářením vhodné vlnové délky a intenzity. Dopováním optického vlákna příměsí germania dochází ke zvýšení jeho fotosenzitivity až o dva řády vůči standardní hodnotě [6]. Pro výrobu Braggových mřížek je vhodné jakékoliv optické vlákno, nejčastěji je používáno standardní optické vlákno pro telekomunikační účely. Nevýhoda těchto vláken spočívá v jejich velmi nízké fotosenzitivitě, pro její zvýšení jsou využívány různé metody.

Jedním ze způsobů zvýšení fotosenzitivity optického vlákna je metoda hydrogenace. Princip je založen na vpravení molekul vodíku do jádra vlákna [6]. Optické vlákno je vloženo do tlakové komory obsahující vodíkovou atmosféru, kde je umístěno několik dnů. Při tlaku 150 atmosfér a teplotách v rozsahu 20 – 100°C dojde k vpravení molekul vodíku do jádra vlákna. Tuto metodu lze běžně aplikovat na téměř libovolný druh optického vlákna. [6].

Dalším způsobem zvýšení fotosenzitivity optického vlákna je metoda žárového žíhání. Princip je založen na vpravení atomů vodíku zahříváním vlákna kyslíko-vodíkovým hořákem na teplotu až 1700°C. Žárové žíhání je obdobná technologie jako hydrogenace [8],[9],[10].

Pro zápis mřížek do vlákna bylo vyvinuto několik postupů pro vytvoření odpovídajícího světelného vzoru. V podstatě lze rozdělit na dvě hlavní skupiny, holografické techniky a bod po bodu.

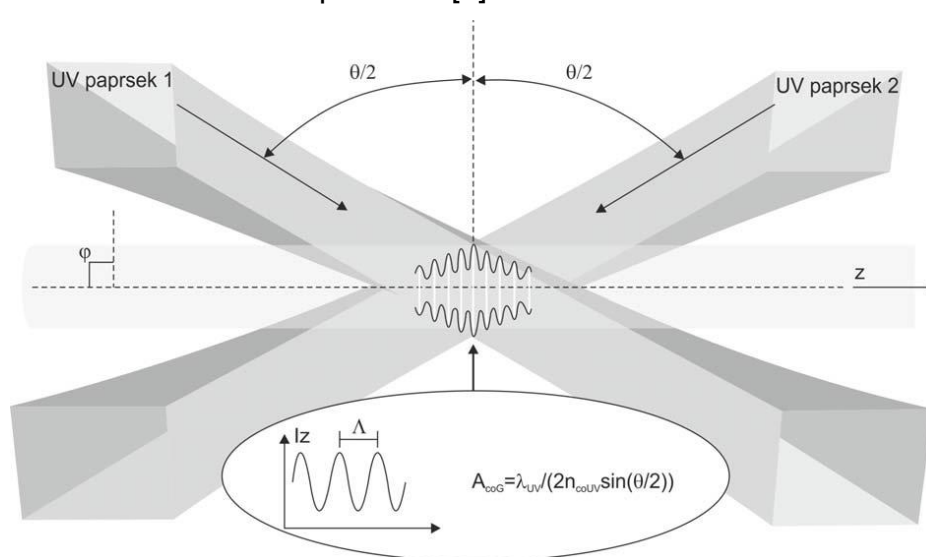
#### 4.2.1 Holografické způsoby zápisu FBG

Světelný proužkový vzor, viz obr. 4.2.1, je vytvořen vzájemnou interferencí dvou zaostřených UV paprsků s vhodnými úhly dopadu, požadovanými prostorovými a podélnými optickými vlastnostmi jako je kvalita paprsku, koherentní parametry, atd. [5] V oblasti překrytí těchto monochromatických paprsků je intenzita, v kterémkoliv bodě podél osy  $z$ , vyjádřena vztahem:

$$I(z) = I_{B1} + I_{B2} + 2(I_{B1} \cdot I_{B2})^{\frac{1}{2}} \cdot \cos \left[ \left( \frac{2\pi n_{coUV}}{\lambda_{UV}} \right) \cdot \sin \left( \frac{\theta}{2} \right) \cdot (L_p - 2z) \right] \quad (1.8)$$

$I_{B1}$	—	intenzita UV paprsku 1
$I_{B2}$	—	intenzita UV paprsku 2
$\theta$	—	jejich úhel dopadu
$\lambda_{UV}$	—	vlnová délka UV záření
$n_{coUV}$	—	index lomu materiálu jádra při UV záření
$L_p$	—	délka překrývající se stopy podél osy $z$

K získání maximální viditelnosti proužků a kontrastního poměru je nutné, aby oba paprsky měly shodnou intenzitu, optickou frekvenci, amplitudu, časovou i prostorovou koherenci. V takovém případě je viditelnost jednotná po celé délce  $L_p$  interferenčního obrazce. V této ideální situaci lze po celé délce  $L_p$  získat konstantní, vysoce kvalitní mřížkování, pakliže je jádro vlákna umístěno v oblasti interferencí s osou šíření kolmo vůči rovinám proužků. [5]

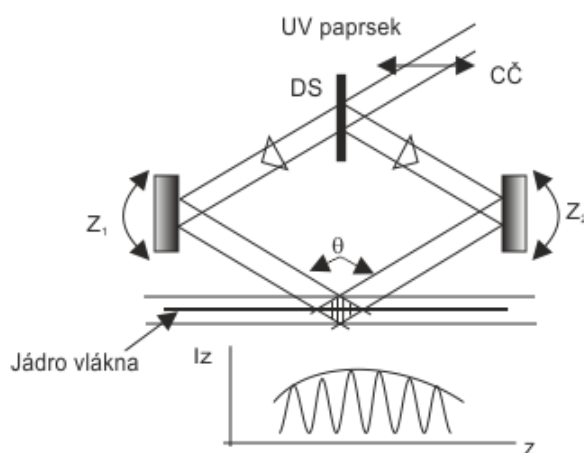


Obr. 4.2.1: Princip holografického zápisu mřížky [5]

Pro opakovatelné získání vysoce kvalitních a přesných mřížek je nutné splnit tři klíčové požadavky: Kvalitu a stabilitu paprsků, precizní a přesné nastavení úhlů dopadu a mechanickou stabilitu celého systému.[5]

#### 4.2.2 Výroba konstantních Braggových mřížek

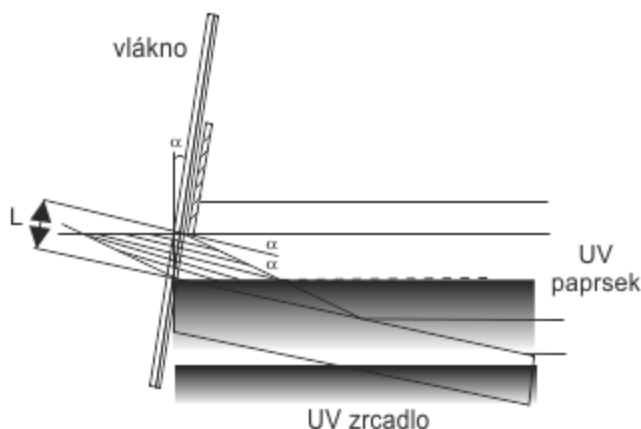
Jedním ze způsobů získání rovnoměrných, konstantních mřížek je použití interferometru se dvěma skly umístěnými na držácích odizolovaných vůči vibracím, současně se zařízením pro přesnou kontrolu úhlu, viz obr. 4.2.2. Základním prvky interferometru jsou dělič svazku, dvě UV zrcadla fixovaná na precizním a přesném zařízení kontrolujícím úhel a jedna nebo dvě cylindrické UV čočky. Jelikož dělič svazku prostorově invertuje paprsek, tudíž v případě špatné prostorové koherence zdroje může být vážně zhoršena kvalita interferenčních proužků. Tuto nevýhodu lze odstranit použitím třetího zrcadla umístěného v cestě UVB paprsku. Snížením délky cesty a zmenšení rozměrů interferometru napomůže ke zvýšení jeho stability.[5]



Obr. 4.2.2: Interferometr se dvěma zrcadly [5]

#### Lloydův interferometr

Jinou možností, která je jednodušší a kompaktnější je použití Lloydova interferometru s jedním zrcadlem, viz obr. 4.2.3. Jeho nevýhodou je omezení délky mřížkování, která je limitována na polovinu průměru UV svazku, díky jednomu použitému zrcadlu a tak koherentním vlastnostem zdroje záření. [5]

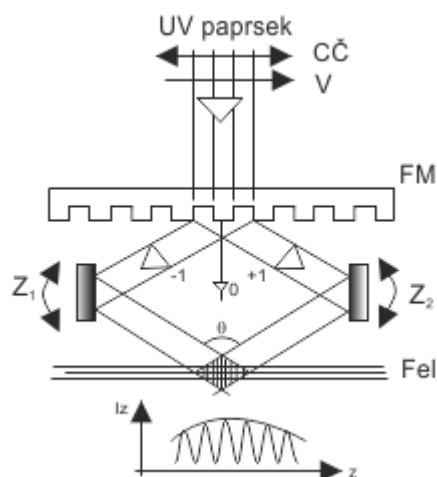


Obr. 4.2.3: Lloydův interferometr [5]



## Holografický interferometr

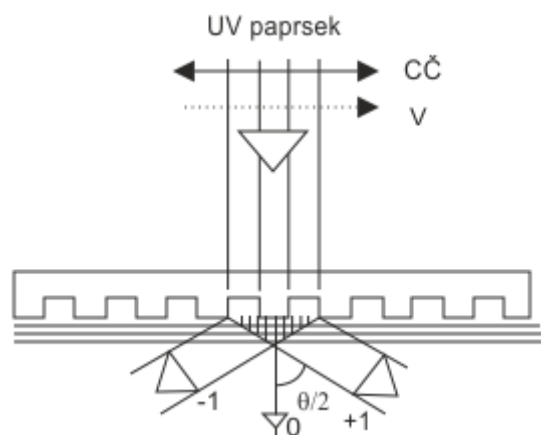
Holografický interferometr je kompaktní a obecně méně náchylný na vibrace, avšak fázovou masku je nezbytné čas od času vyčistit, neboť používáním dochází k její degradaci. Bohužel, pro každou Braggovskou vlnovou délku je potřeba mít jinou fázovou masku. Z důvodu odstranění této nevýhody a také kvůli zamezení nulového řádu vznikl přidáním dvou pevných zrcadel nebo obdélníkového křemenného bloku holografický interferometr, viz obr. 4.2.4. Fázová maska je zde použita jako dělič výkonu a pokud jedno nebo obě zrcadla jsou otočná a/nebo přemístitelná může tak vzniknout rozměrově malý interferometr, který v sobě slučuje flexibilitu zrcadlových interferometrů a kompaktnost interferometrů s fázovou maskou.[5]



Obr. 4.2.4: Holografický interferometr [5]

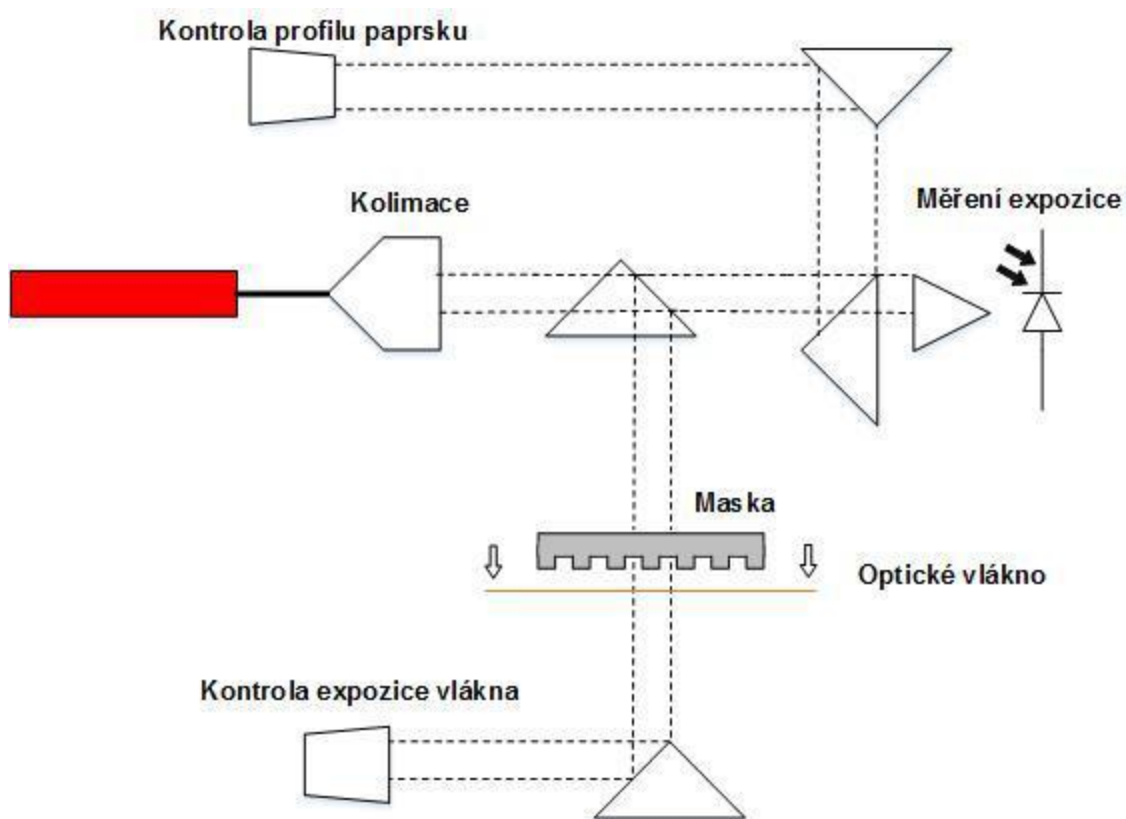
## Fázová maska

Mnoho nevýhod výše uvedených interferometrů odstraňují technologie využívající fázové masky. Fázová maska je planární, difrakční, optický prvek, který rozděluje dopadající paprsek, podle přesně navržené mřížky. Pro danou UV vlnovou délku lze navrhnout fázovou masku tak, aby koncentrovala rozdělený výkon do  $\pm 1$  difrakčního řádu a minimalizovala nulový řád. Převážně jsou vyráběny masky optimalizované pro kolmý úhel dopadu ( $\theta = 0$ ). U takových masek je dopadající UV záření rozděleno do prvních dvou řádů (přibližně 35 % - 40 % do +1 a -1 řádu) a pouze malá část (méně než 4%) zůstává v nulovém řádu. Samotné vlákno je umístěno přímo pod masku, do místa, kde vzniká interferenční obrazec, viz obr. 4.2.5. Perioda interferenčních proužků má poloviční periodu fázové masky a je nezávislá na vlnové délce UV záření, což usnadňuje výrobu vláknových mřížek se stejnou Braggovskou vlnovou délkou. Nicméně, každá fázová maska má nulový řád minimalizovaný pro jednu určitou vlnovou délku a proto by měla být používána obezřetně, neboť na jiné vlnové délce může ovlivnit vzor mřížky. [5]



Obr. 4.2.5: Princip fázové masky [5]

Fázová maska tvoří pouze malou, ale podstatnou část expoziční soustavy. Celá expoziční soustava je schematicky znázorněna na obr. 4.2.6.



Obr. 4.2.6: Schéma optické soustavy pro výrobu difrakční mřížky [6]

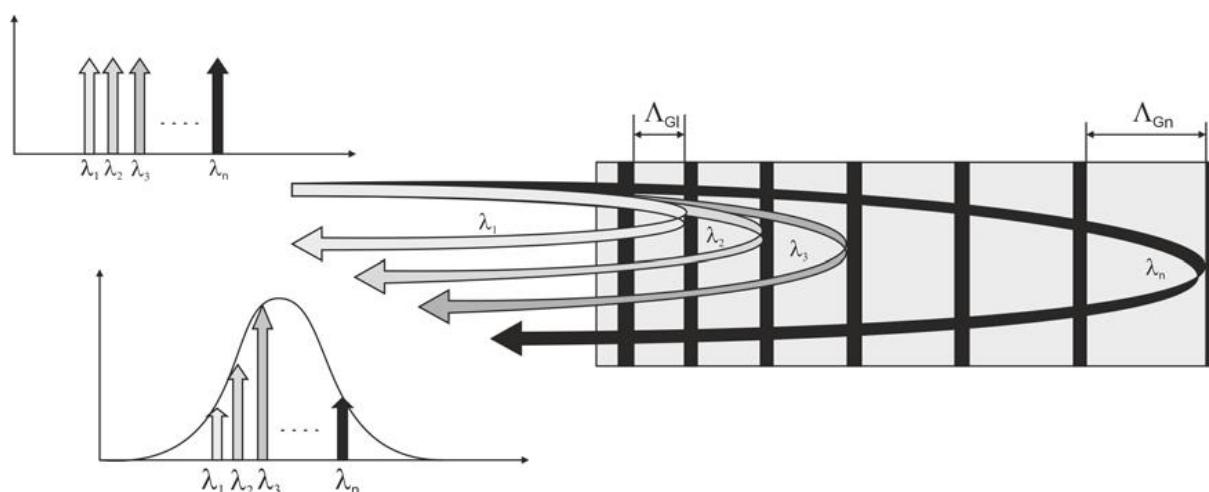
### 4.2.3 Výroba nerovnoměrných Braggových mřížek

Aperiodické, rozmítané či nerovnoměrné mřížky jsou využívány ve značném rozsahu senzorických i komunikačních aplikací. Parametry mřížky ovlivňují šířku pásma a řídí obálku modulu a fáze odezvy odrážející se na mřížce.[5] Tímto způsobem mohou být pozice Braggovské vlnové délky umístěny po celé délce mřížky díky měnícímu se indexu lomu nebo periodě mřížky, dle vztahu:

$$\lambda_B(z) = 2n_{eff}(z)\Lambda_G(z) \quad (1.9)$$

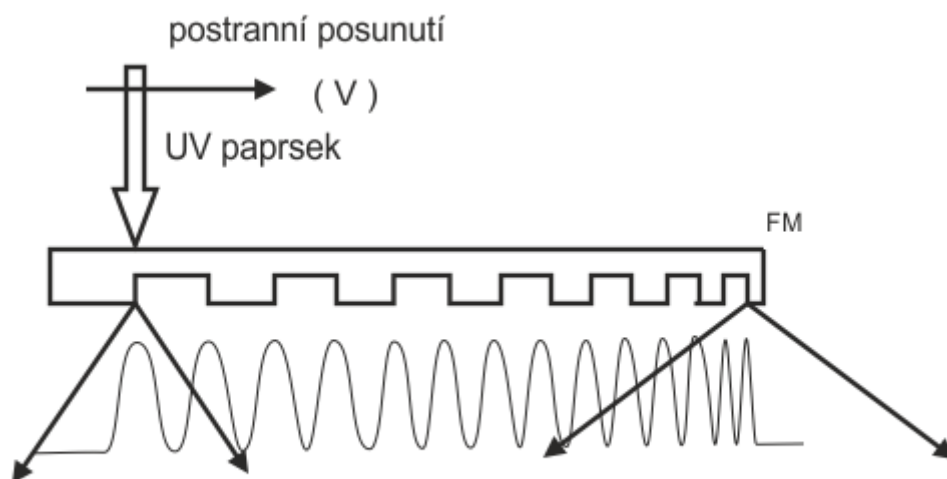
Pro získání pozičně závislého (rozmítaného) efektivního indexu lze použít několik metod: amplitudovou apodizaci proužkových obrazců UV záření, pozičně závislou periodu proužků nebo kombinaci obou předchozích metod.

Efekt poziční závislosti rezonanční podmínky mřížky je znázorněn na obr. 4.2.7. Vlnová délka odraženého světla v různých bodech po délce mřížkové struktury se řídí fázovou podmínkou.



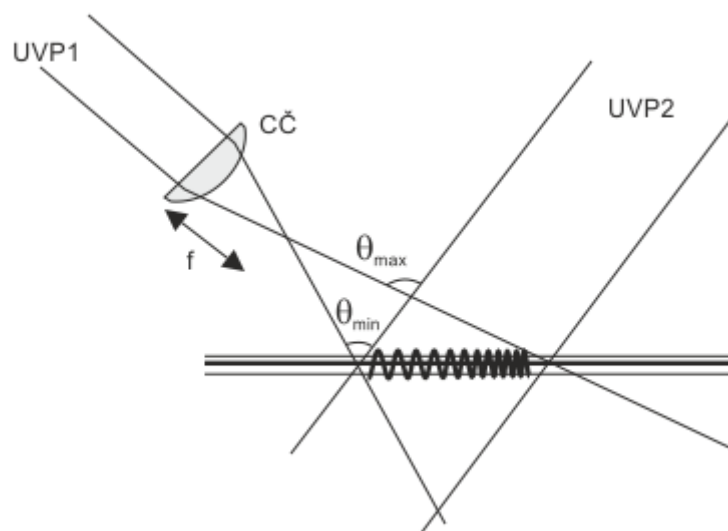
Obr. 4.2.7: Poziční závislost rezonanční podmínky rozmítané Braggovské mřížky [5]

Při výrobě aperiodických mřížek je uplatněna řada technik, využívající optické součástky a aperiodické fázové masky. Přesné a precizní aperiodické mřížky lze vyrobit při použití aperiodické fázové masky, viz obr. 4.2.8. [5]



Obr. 4.2.8: Zápis mřížky pomocí aperiodické fázové masky [6]

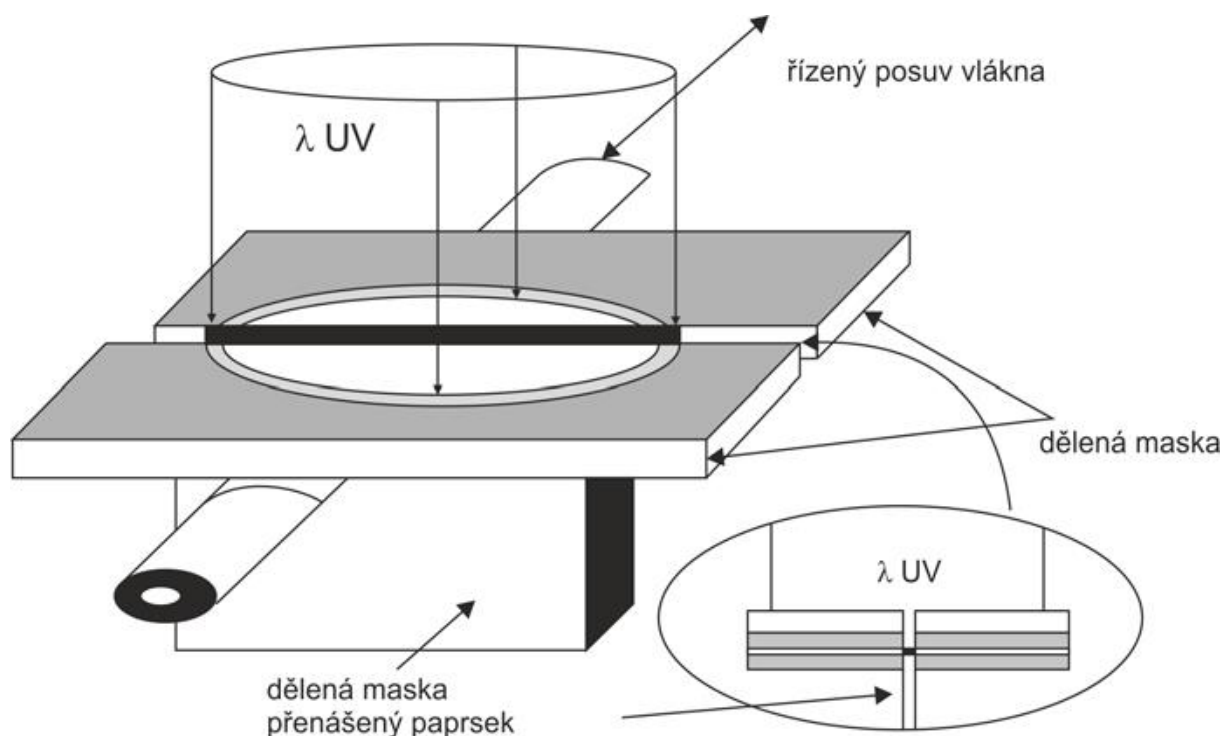
Při použití zaostřujících a rozostřujících cylindrických čoček v cestě dopadajících paprsků dojde k vytvoření aperiodických interferenčních proužků, viz obr. 4.2.9. Lineárně se zvětšující periodu proužků lze totiž získat s pomocí kolimovaného paprsku a jedné cylindrické čočky. [5]



Obr. 4.2.9: Zápis mřížky pomocí cylindrických čoček [5]

#### 4.2.4 Výroba metodou bod po bodu

Metoda bod po bodu využívá při výrobě mřížky výkonný pulsní laser. Světlo laseru je soustavou čoček soustředěno do koherentního paprsku. Tento paprsek projde štěrbinou, kde je zúžen do požadované šířky, odpovídající rozměru jedné oblasti zvýšeného indexu lomu v mřížce. Optické vlákno je umístěno na posuvném stolku pod štěrbinou. Motorizovaný stolek pohybující se přesně definovanou rychlostí a spolu s frekvencí impulsů laseru, určuje periodu mřížky. Změnu periody mřížky lze velmi snadno dosáhnout buď změnou rychlosti posuvu vlákna, nebo změnou frekvence impulsů laseru, viz obr. 4.2.10. Tímto způsobem je možné snadno vyrábět mřížky s libovolnou periodou [6],[9],[10].



Obr. 4.2.10: Princip metody bod po bodu [5]

Touto metodou je možné vyrobit velké množství různě navržených mřížkových struktur, neboť nárůst indexu je závislý na dávce UV záření a energii z pulzních či CW zdrojů pro každý bod je možné řídit, stejně jako pozici vlákna. Rozmítané mřížky lze přesně vyrobit pomocí zvyšování překladů vlákna při každém jeho ozáření. Tato metoda má však i nevýhody. Metoda bod po bodu je velmi zdoluhavý výrobní proces, neboť je prakticky nemožné přesně zaostřit UV záření na štěrbinu o submikronových rozměrech. To má za následek vznik difrakčních obrazců vyšších řádů. [5]

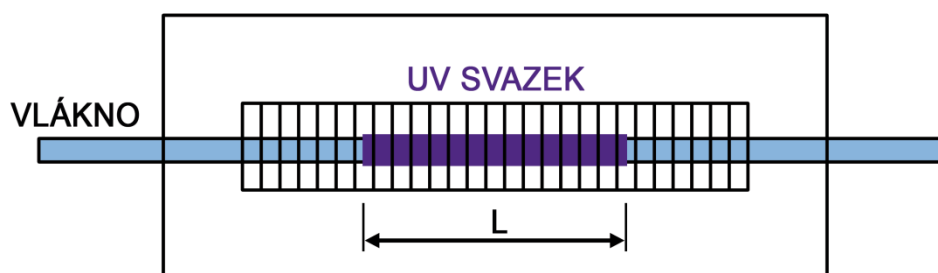
## 5 STRUKTURY V OPTICKÉM VLÁKNĚ

Současný dynamický rozvoj technologie optických vláken nabízí nové možnosti využití nejen v průmyslu, ale i dalších oborech lidské činnosti. S postupným vývojem této technologie v následujících letech, bylo možné použít získané znalosti pro výrobu senzorů z optických vláken. S jejich výrobou došlo k rychlému rozšíření a následnému vývoji různých typů pro různé aplikace. Vzhledem k faktu že tato oblast není zcela prozkoumána, probíhalo nejdříve měření moaré kolmých FBG a posléze moaré nakloněných struktur. Moaré je rušivý optický efekt, který vzniká překrýváním nebo interferencí dvou pravidelných a jen málo odlišných struktur. Jev je založen na interferenci světla na optických mřížkách, rozdíl mezi mřížkami dává vzniknout moiré, tedy odrazům, reprezentovaných dvěma peaky jejichž vrcholy jsou vzájemně posunuty o rozteč mřížky. Experimentálně bylo ověřeno chování těchto struktur a charakteristika jejich spektra.

### 5.1 Typy struktur v optickém vlákně

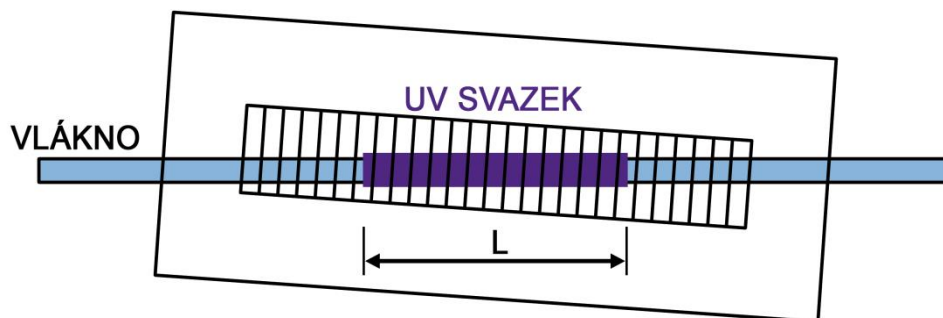
Prvním krokem pro realizaci zápisu kolmé struktury do optického vlákna je návrh fázové masky. Fázová maska je vyrobena litografickou metodou, jako výchozí materiál pro zápis je používána skleněná destička. Pro zápis vláknových mřížek je využíván výkonný excimerový pulsní laser a expozice prostřednictvím fázové masky. Parametry zapisovaných mřížek jsou kontrolovány v reálném čase, tímto způsobem je zaručena jejich vysoká přesnost a opakovatelnost výroby. Pomocí této metody je možné zapisovat jak běžné (FBG), tak nakloněné (Tilted FBG) mřížky.

Princip vytvoření kolmé struktury v optickém vlákně osvitom UV laserem přes štěrbinu a fázovou masku, viz obr. 5.1.1. Jednotlivé modifikace fázové masky v kombinaci s jejich natáčením, umožňují vytvářet různé varianty struktur v optickém vlákně.



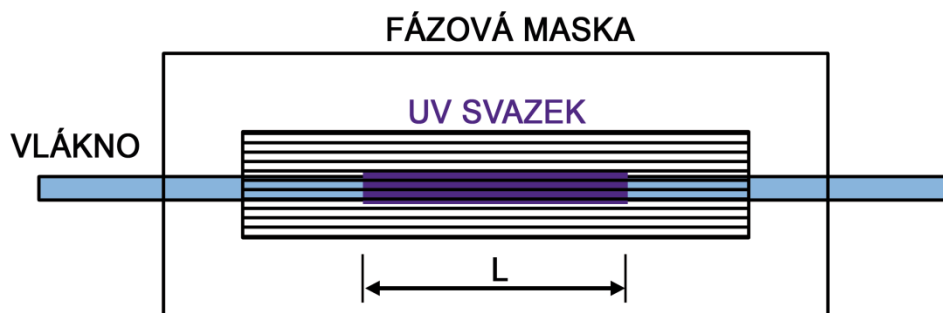
Obr. 5.1.1: Fázová maska s kolmou strukturou

Natočením fázové masky s kolmou strukturou lze vytvořit v optickém vlákně nakloněnou strukturu, viz obr. 5.1.2.



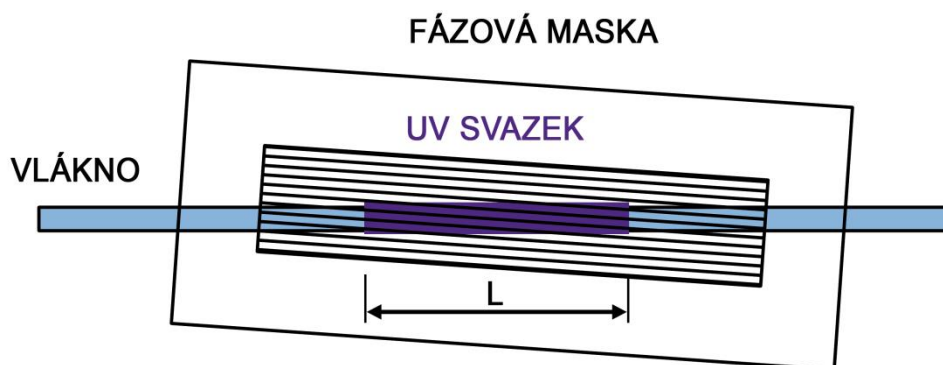
Obr. 5.1.2: Fázová maska s nakloněnou strukturou

Pro podélnou strukturu je nutná výroba jiné fázové masky, postup vytvoření v optickém vlákně je stejný jako u kolmé struktury, viz obr. 5.1.3.



Obr. 5.1.3: Fázová maska s podélnou strukturou

Natočením fázové masky s podélnou strukturou, obdobně jako u kolmé struktury, lze vytvořit v optickém vlákně podélnou nakloněnou strukturu, viz obr. 5.1.4.



Obr. 5.1.4: Fázová maska s podélnou nakloněnou strukturou

## 5.2 Vícenásobná struktura v optickém vlákně

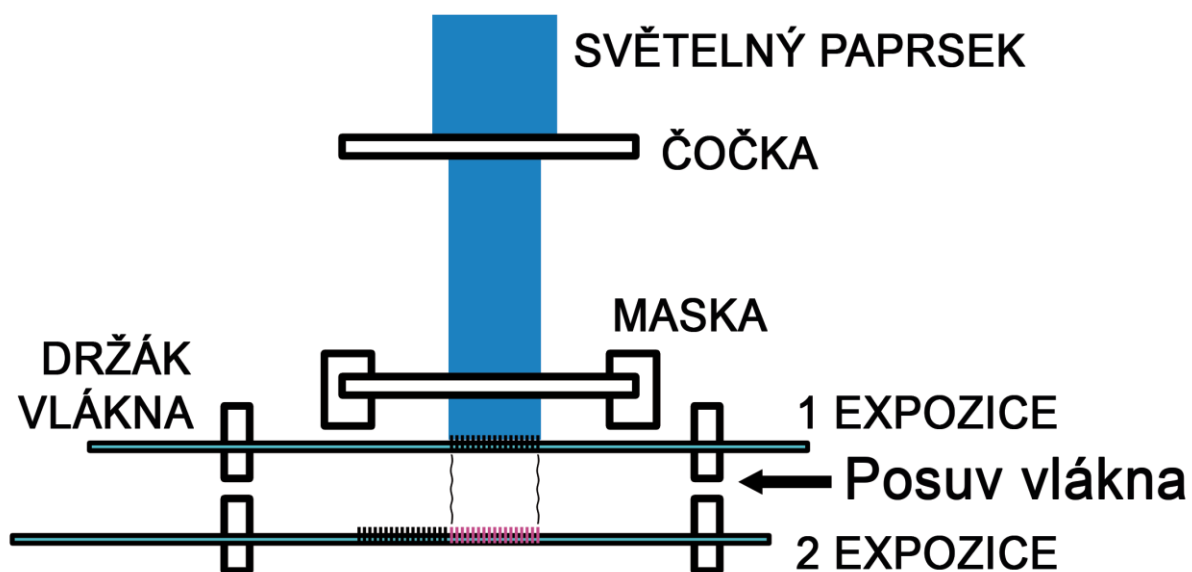
Jak je zřejmé z obr. 5.2.1, vlákno určené pro vytvoření vícenásobné mřížky bylo umístěno pod fázovou masku, fixováno prostřednictvím magnetů a vystaveno expozici UV laseru. V diplomové práci byly experimentálně ověřeny tři typy struktur.

V prvním případě bylo vlákno umístěné pod fázovou maskou vystaveno expozici UV laseru. Po vytvoření mřížky byla část této struktury vystavena ohřevu horkým vzduchem o teplotě 800 °C, při kterém došlo v daném místě k degradaci části mřížky.

V druhém případě bylo vlákno po vyexponování první mřížky posunuto o 1 mm a vystaveno druhé expozici UV záření. Vícenásobná struktura vznikla záznamem dvou kolmých mřížek mezi sebe.

V třetím případě byla u vlákna po záznamu první mřížky natočena fázová maska o 1° a vlákno vystaveno druhé expozici UV záření. Vícenásobná struktura vznikla záznamem kolmé a nakloněné mřížky přes sebe.

Obdobným způsobem lze vytvářet libovolné kombinace kolmých, nakloněných i podélných struktur. K zápisu struktur bylo použito jednovidové vlákno CORNING SMG-28 o průměru 9 μm.



Obr. 5.2.1: Princip vytvoření vícenásobné struktury ve vlákně



# 6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLÁKNOVÝCH VÍCENÁSOBNÝCH STRUKTUR

## 6.1 Příprava mřížek pro měření

Příprava na experimentální měření, realizované v laboratořích společnosti NETWORK GROUP, reprezentovala zhotovení několika exemplářů vícenásobných Braggových mřížek. Jako materiál pro výrobu mřížek bylo použito optické vlákno CORNING SMG-28. K zápisu vláknových mřížek byla použita metoda bočního osvětlení UV laserem přes fázovou masku. Zdrojem zapisovacího svazku byl excimerový KrF laser Coherent Compex Pro 110. Samotný zápis mřížek byl realizován v zapisovací stanici LML-FBG-100, která zaručuje vysoce přesné a opakovatelné prostorové uspořádání výrobních součástí, monitorování vlastností UV svazku a kontrolu výrobního procesu. Pro zvýšení fotosenzitivity vláken je laboratoř vybavena dvojicí hydrogenačních komor, viz obr. 6.1.1, dále zařízením pro stripování vláken chemickým stažením krycí vrstvy, které garantuje maximální zachování pevnostních parametrů vlákna i zařízením pro obnovu primární ochrany vyrobených mřížek.

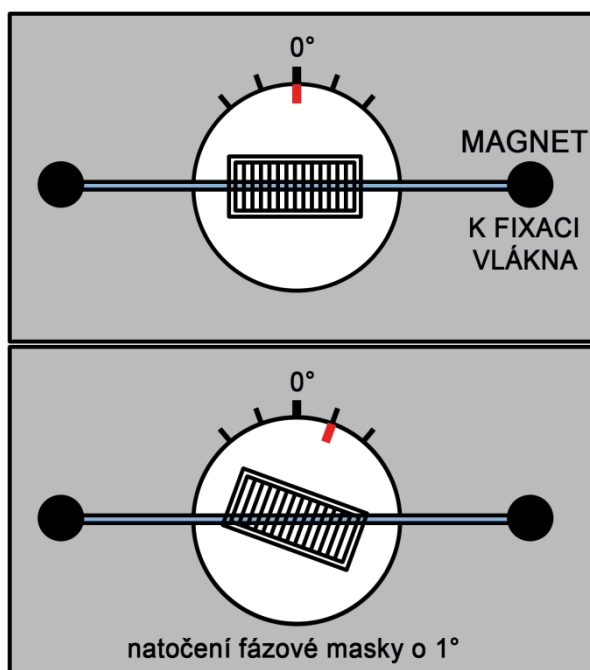


Obr. 6.1.1: Dvojice hydrogenačních komor

Příprava optického vlákna spočívala ve zvýšení jeho fotosenzitivity metodou hydrogenace. Při hydrogenaci bylo optické vlákno vloženo do tlakové komory, kde na něj působila vodíková atmosféra za vysokého tlaku a teploty po dobu tří dnů.

Po vyjmutí vlákna z hydrogenační komory však dochází k postupnému vyprchávání vodíku z jádra vlákna, a tím k degradaci jeho fotosenzitivity. Proto je nezbytně nutné vlákno uložit do mrazicího boxu při teplotě - 40 °C do doby, než nastane expozice. Za těchto podmínek je možné uchovat vlastnosti vlákna přibližně po dobu 3 - 4 týdnů. U vlákna vyjmutého z mrazicího boxu byla na stripovacím zařízení uskutečněna tahová pevnostní zkouška a vlákno zbaveno primární ochrany. Současně se zbavením primární ochrany byl na vlákne označen úsek, kam bude proveden zápis Braggovy mřížky. Označení je nezbytné, neboť samotná mřížka je pro lidské oko nerozpoznatelná. Dále následovalo usazení vlákna do přípravku s fázovou maskou a zafixována jeho poloha, viz obr. 6.1.2. Následně byl přípravek s vláknem vložen do zapisovací stanice a provedena expozice vlákna koherentním UV svazkem přes fázovou masku. Vlákno s vyexponovanou mřížkou bylo vloženo do temperovací pece, kde bylo po dobu několika hodin vystaveno teplotě 100 °C. Vyvázáním vodíku z jádra vlákna temperováním bylo dosaženo stability optického vlákna.

Podle struktury použité masky lze realizovat zápis kolmé a podélné mřížky. Strukturu nakloněné mřížky lze vytvořit změnou natočení přípravku s fázovou maskou, viz obr. 6.1.2. Měření byla uskutečněna na několika vícenásobných mřížkách vyrobených různými technologickými postupy.



Obr. 6.1.2: Přípravek s fázovou maskou

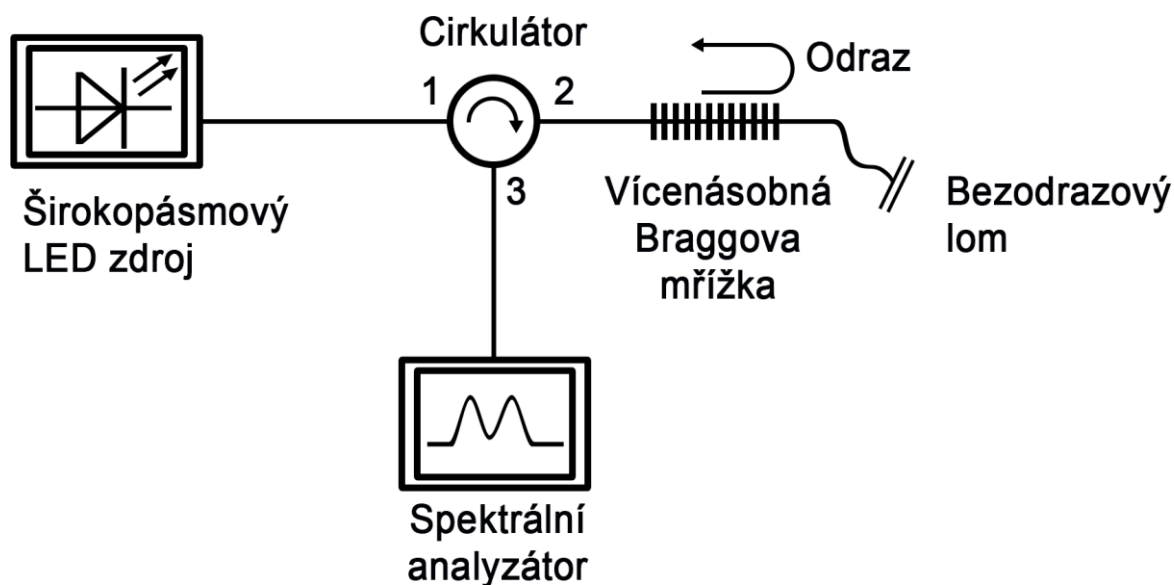
Fázová maska byla vyrobena litografickou metodou. Na substrát, skleněnou destičku, byla nanášena tenká vrstva vhodného rezistu a poté byla na tento substrát promítnuta maska obsahující geometrii struktur. Po vyvolání vzorku ve vhodném rozpouštědle byla přenesená struktura vyleptána. Nevýhodou je, že v případě změny vlnové délky vyvstává nutnost pro každou strukturu připravit jinou masku, která je velmi drahá. V horní části přípravku je stupnice cejchovaná ve stupních, umožňující nastavení úhlu fázové masky vůči vláknu. Magnet umístěný vpravo i vlevo, zajišťuje napnutí a fixaci vlákna. Z opačné strany přípravku je osazena clona se štěrbinou. Procházející UV paprsek je touto štěrbinou zúžen a přes fázovou masku dochází k zapsání mřížky do vlákna. Mřížky byly vyrobeny na pracovišti pro zápis a měření mřížek, viz obr. 6.1.3.



Obr. 6.1.3: Pracoviště pro zápis a měření mřížek

## 6.2 Měření vícenásobných Braggových mřížek

Měření vícenásobných Braggových mřížek zahrnovalo dva typy měření. První experiment zahrnoval měření odrazu vícenásobných mřížek při tahovém namáhání vlákna, druhý experiment měření odrazu v závislosti na zvyšující se teplotě vlákna. Schéma měřicí soustavy tvořené širokopásmovým polovodičovým zdrojem záření, cirkulátorem, měřenou vícenásobnou Braggovou mřížkou a spektrálním analyzátozem je na obr. 6.2.1. Měřicí soustava pracovala s vlnovou délkou 1550 nm, napájecí a snímací větve odděloval optický vlnový cirkulátor, operativní spojení vláken zajistily optické rychlospojky. Spektrum odraženého signálu bylo měřeno spektrálním analyzátozem EXFO FTB-500 nastaveným na vlnovou délku 1550 nm s rozlišením 1,5 pm. Měřené vlákno s vícenásobnou mřížkou bylo jedním koncem přes optickou rychlospojku připojeno k cirkulátoru v měřicí soustavě, druhý konec vlákna byl zakončen bezodrazovým lomem.

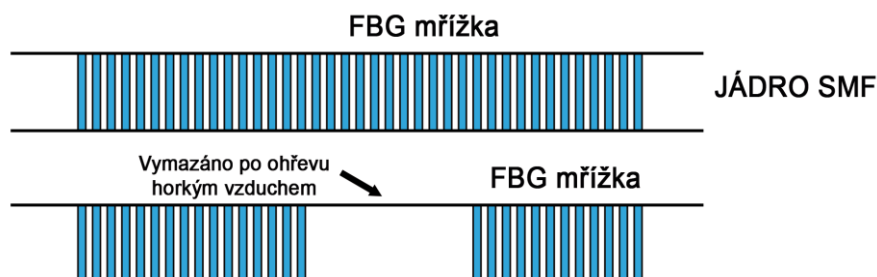


Obr. 6.2.1: Schéma měřicí soustavy odrazu vícenásobné Braggovy mřížky

Klíčovou záležitostí při zapojování měřicí soustavy byla nutnost pečlivě připojit vlákna do rychlospojek, aby nedocházelo vlivem útlumu ke zkreslení výsledků měření. Celá měřicí soustava byla upevněna k antivibračnímu stolu, který eliminoval jakékoliv vnější mechanické chvění. Jako první bylo realizováno měření u kolmé vícenásobné FBG zapsané přes sebe, s provedeným vymazáním části vytvořené struktury horkým vzduchem. Dále následovalo měření kolmé vícenásobné FBG zapsané mezi sebe a jako poslední bylo realizováno měření vícenásobné FBG s kolmou a nakloněnou strukturou. Odrazové roviny nakloněné struktury o úhel  $\alpha$  vůči ose vlákna odráží světelné záření částečně do vidu vedeného jádrem a částečně do vidu vedeného pláštěm.

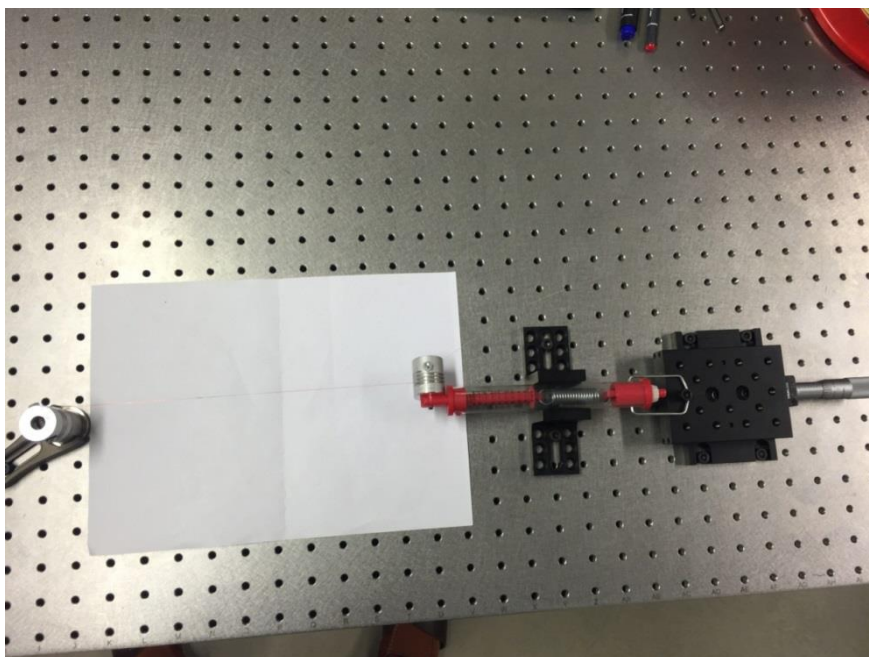
### 6.2.1 Vícenásobná degradovaná kolmá FBG mřížka

K zápisu mřížky bylo použito jednovidové optické vlákno. Vlákno bylo umístěno pod fázovou masku a vystaveno expozici UV laseru. Po vytvoření mřížky byl střed této struktury vystaven bodovému ohřevu horkým vzduchem o teplotě 800 °C, při kterém došlo v daném místě k vymazání části mřížky, viz obr. 6.2.2. Takto připravená mřížka byla podrobena měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna.



Obr. 6.2.2: Vymazané místo v mřížce po ohřevu horkým vzduchem

Vlákno bylo upnuto přes upínací a tahovou kladku, siloměr a napínací šroub s mikroposuvem k desce antivibračního stolu, viz obr. 6.2.3. Konce vlákna, byly připojeny k měřicí soustavě prostřednictvím optických rychlospojek. Měřicí soustava byla umístěna na antivibračním stole pracujícím na principu tlakových pneumatických pístů, které aktivně vyrovnávají působící vnější vlivy.

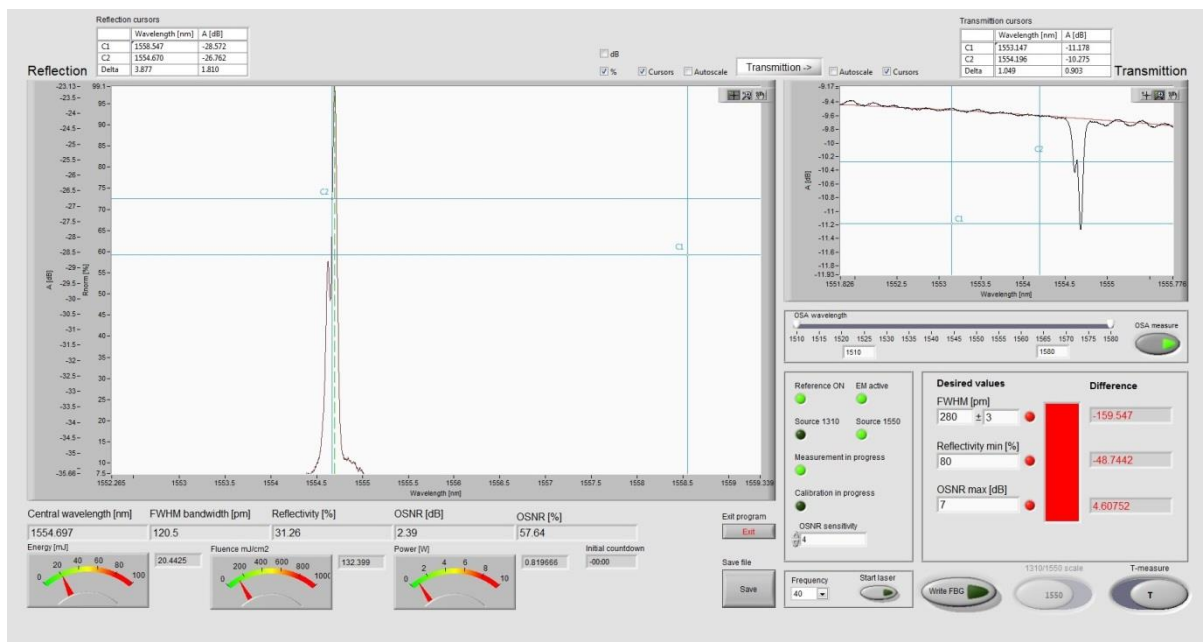


Obr. 6.2.3: Experimentální přípravek k tahovému měření vlákna

Referenční hodnoty vlákna byly změřeny v nenapnutém stavu, viz obr. 6.2.4

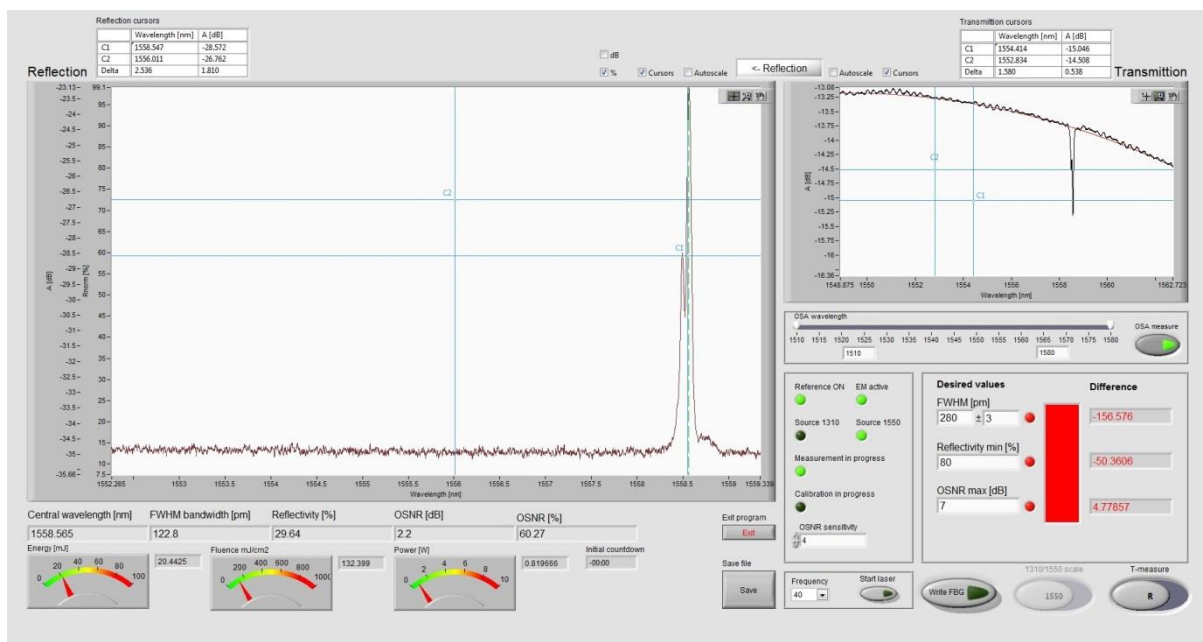


Na grafu jsou dobře patrné odrazové peaky reprezentující obě mřížky. Výšková deformace druhého peaku je zřejmě způsobena zapsáním jedné mřížky přes druhou. Vzdálenost vrcholů mezi oběma peaky činí 72 pm.



Obr. 6.2.4: Odrazové spektrum degradované kolmé FBG mřížky napnuté silou 0 N

Vlákno bylo předeprnuto na počáteční hodnotu 0 N a změřena charakteristika odrazu, viz obr. 6.2.5



Obr. 6.2.5: Odrazové spektrum degradované kolmé FBG mřížky napnuté silou 3 N

Při napnutí vlákna silou 4 N, došlo k prasknutí vlákna uprostřed mřížky. Tato skutečnost byla zřejmě způsobena horkým vzduchem při vymazání mřížky, kdy došlo

k ztenčení vlákna a výraznému snížení jeho mechanické pevnosti. Naměřené hodnoty odrazu v závislosti na napnutí vlákna jsou vyneseny do tabulky, viz obr. 6.2.6. Z tabulky je rovněž patrný posuv vrcholů peaků C1 a C2 přibližně o 4 nm směrem k vyšším vlnovým délkám.

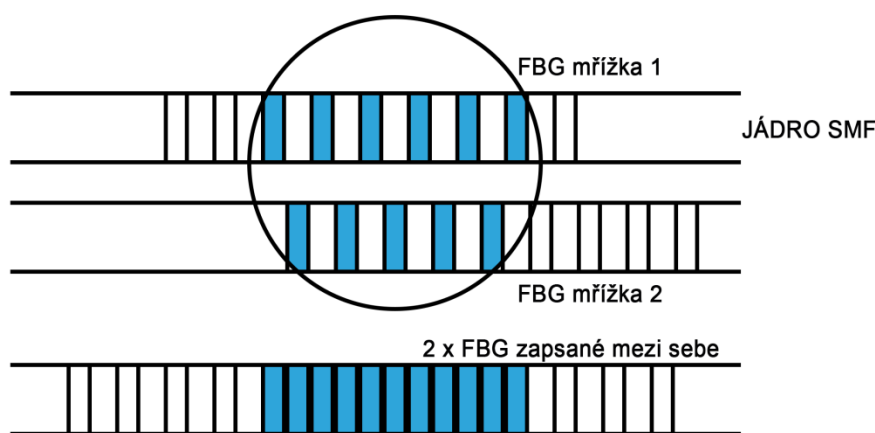
Vícenásobná degradovaná kolmá FBG mřížka měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna			
Napnutí vlákna [N]	Peak C1 [nm]	Peak C2 [nm]	Vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 [pm]
0	1554,598	1554,67	72
3	1558,474	1558,547	73
4	vlákno prasklo uprostřed mřížky		

Obr. 6.2.6: Hodnoty odrazu degradované kolmé FBG mřížky v závislosti na napnutí vlákna

Peak C1 — první špička odrazového spektra FBG mřížky  
Peak C2 — druhá špička odrazového spektra FBG mřížky

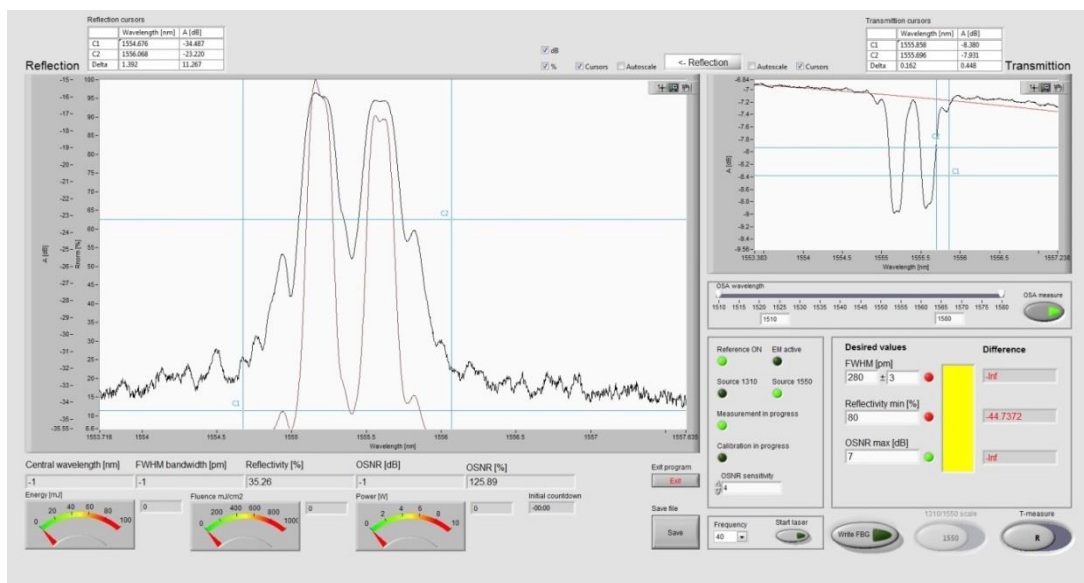
## 6.2.2 Vícenásobná kolmá FBG mřížka

K zápisu mřížek bylo použito opět jednovlákenné optické vlákno. U mřížky byl proveden zápis dvou mřížek mezi sebe. Vlákno bylo umístěno pod fázovou masku a vystaveno expozici UV laseru. Po vyexponování první mřížky bylo vlákno posunuto o 1 mm a vystaveno druhé expozici UV záření, viz obr. 6.2.7. Mřížky měly stejnou odrazivost i vlnovou délku. Vlákno s mřížkou bylo zafixováno do přípravku k tahovému měření vlákna a měřeno odrazové spektrum struktury. Konce vlákna byly připojeny k měřicí soustavě prostřednictvím optických rychlospojek.



Obr. 6.2.7: Princip zápisu dvou mřížek mezi sebe

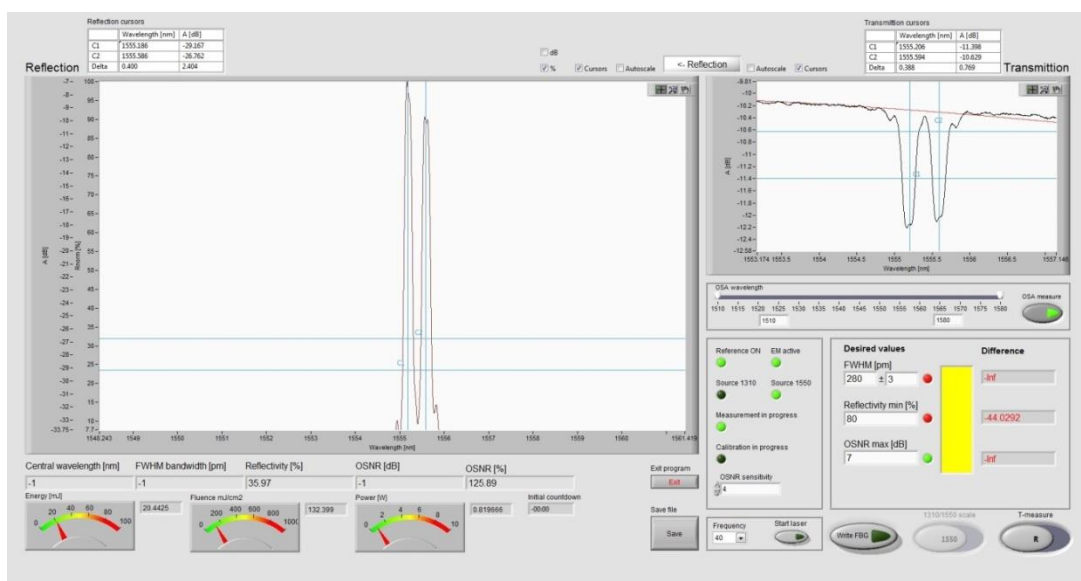
Na grafu jsou dobře patrné špičky odrazového spektra reprezentující obě mřížky. Výšková deformace druhého peaku je zřejmě způsobena zapsáním jedné mřížky přes druhou. Vzdálenost vrcholů mezi oběma peaky činí 72 pm, viz obr. 6.2.8



Obr. 6.2.8: Odrazové spektrum kolmé FBG mřížky

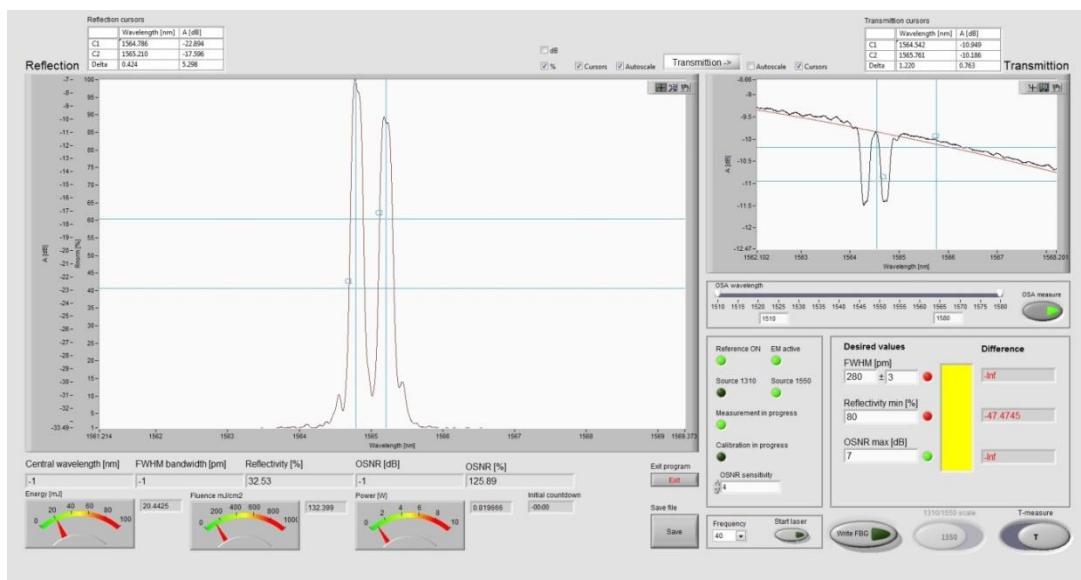


Vlákno bylo napnuto na počáteční hodnotu 0 N a změřena charakteristika odrazu, viz obr. 6.2.9. Stejně jako u mřížky č. 2 je zde patrná výšková deformace druhého peaku. V tomto případě zřejmě nedošlo k zapsání mřížek přesně mezi sebe a mřížky se navzájem překrývají.



Obr. 6.2.9: Odrazové spektrum kolmé FBG mřížky napnuté silou 0 N

Změřená charakteristika odrazového spektra při napnutí vlákna silou 6 N, viz obr. 6.2.10



Obr. 6.2.10: Odrazové spektrum kolmé FBG mřížky napnuté silou 6 N

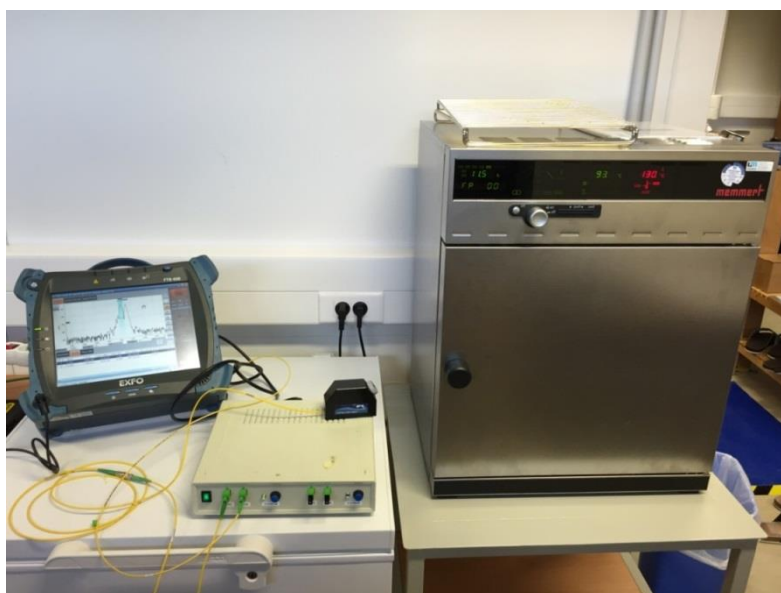
Při napnutí vlákna silou 9,5N došlo k prasknutí vlákna uprostřed mřížky.

Vícenásobná kolmá FBG mřížka měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna			
Napnutí vlákna [N]	Peak C1 [nm]	Peak C2 [nm]	Vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 [pm]
0	1555,186	1555,586	400
3	1558,862	1559,259	397
6	1564,786	1565,21	424
8	1567,153	1567,572	419
9,5	vlákno prasklo uprostřed mřížky		

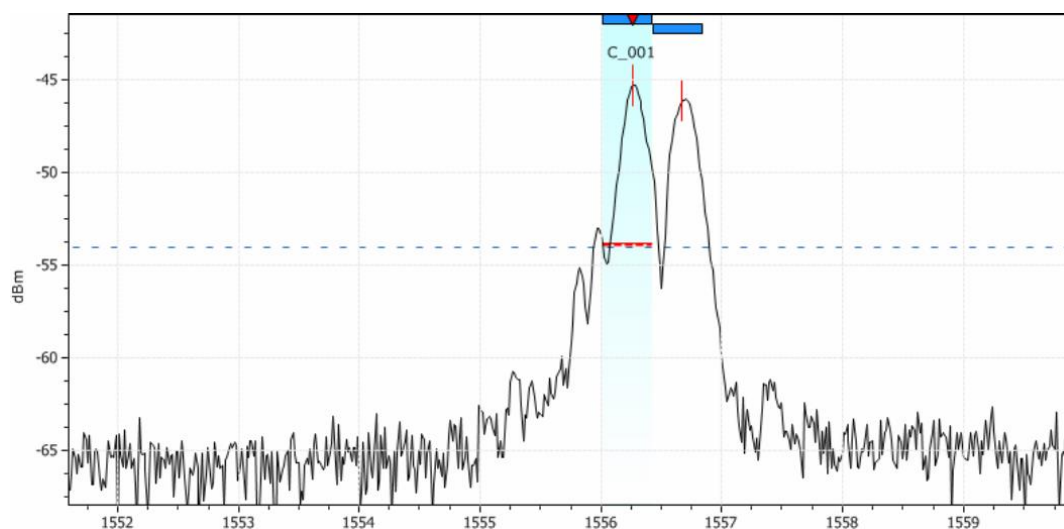
Obr. 6.2.11: Hodnoty odrazu kolmé FBG mřížky v závislosti na napnutí vlákna

Působením tahové síly na vlákno s mřížkou dochází k posuvu špiček odrazového spektra C1 a C2 cca o 12 nm směrem k vyšším vlnovým délkám, viz tabulka na obr. 6.2.11. Vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 zůstala přibližně stejná.

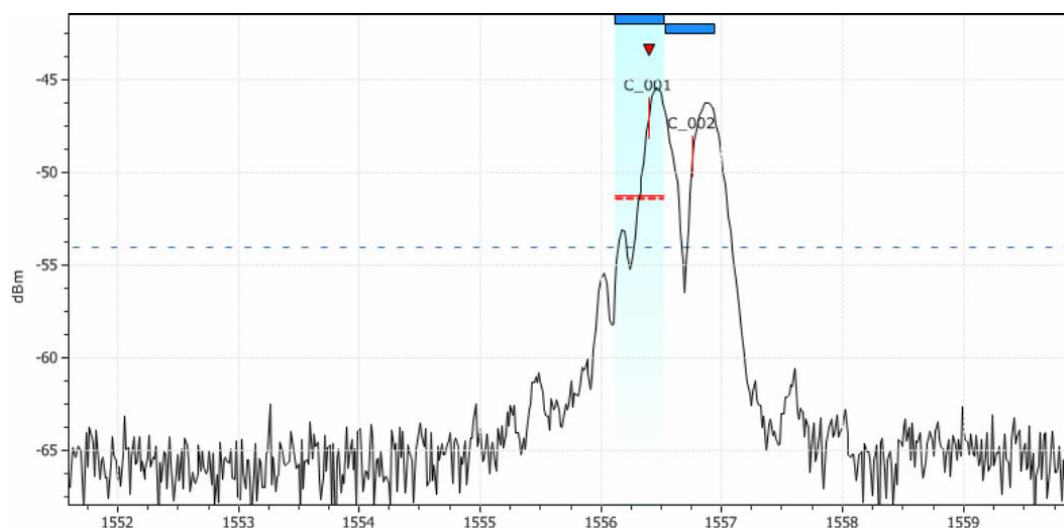
Náhradou za prasklé vlákno bylo k měření odrazu v závislosti na teplotě použito jiný exemplář vlákna s mřížkou, vyrobenou stejným způsobem. K zápisu mřížky bylo použito opět SMF optické vlákno. Měřené vlákno bylo vloženo do temperovací pece Memmert, viz obr. 6.2.12 a postupně temperováno na teplotu 90°C, 110°C, 130°C a 150°C. Při temperování vlákna na vyšší teploty hrozí vyžhání vlákna, snížení jeho mechanické pevnosti a v krajním případě jeho spečení a rozpadnutí. K analýze, zobrazení a uložení naměřených hodnot byl použit spektrální analyzátor EXFO FTB-500. Měření bylo provedeno u více vláken s různými typy moaré struktur. Výsledky u všech měřených vzorků vycházely obdobně.



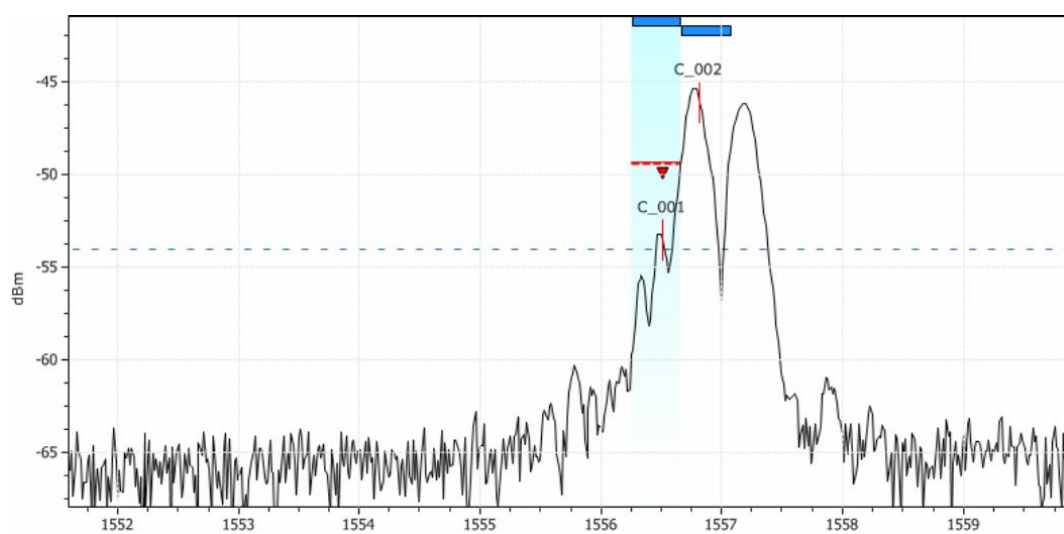
Obr. 6.2.12: Měření odrazu v závislosti na teplotě vlákna



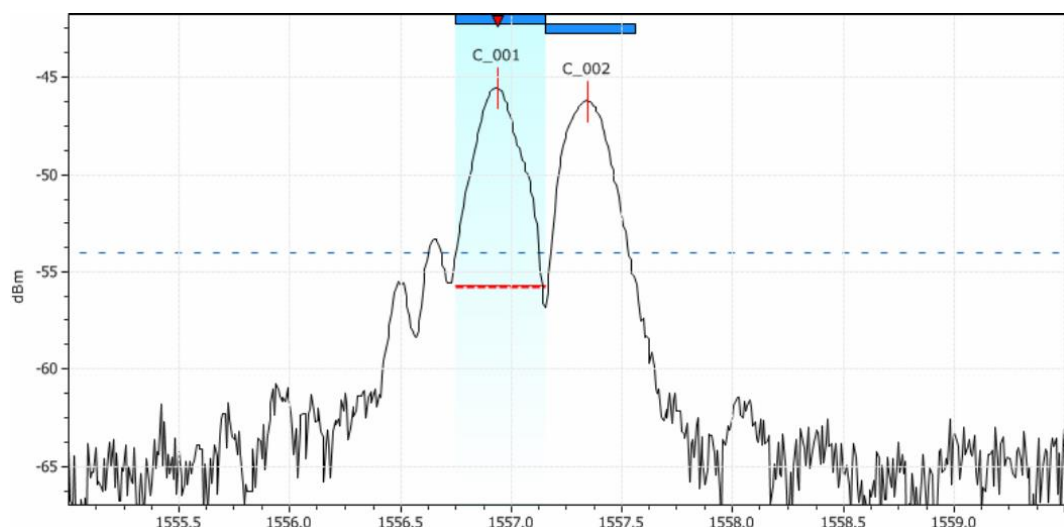
Obr. 6.2.13: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 90°C



Obr. 6.2.14: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 110°C



Obr. 6.2.15: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 130°C



Obr. 6.2.16: Odraz kolmé FBG mřížky při teplotě vlákna 150°C

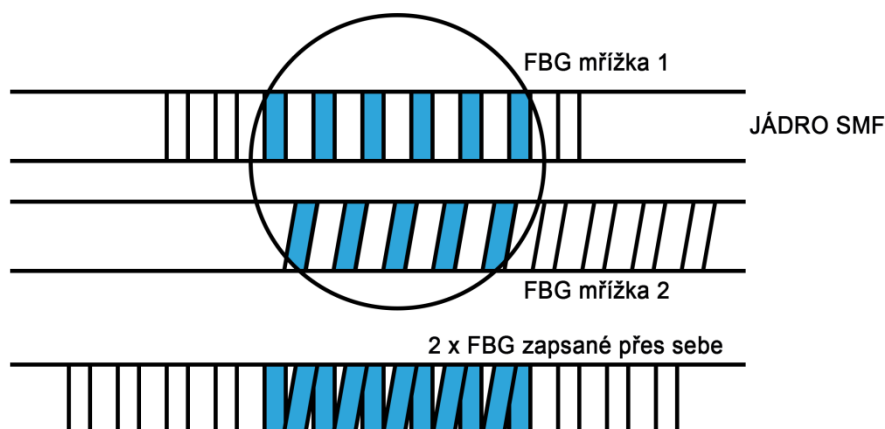
Vícenásobná kolmá FBG mřížka měření odrazu v závislosti na teplotě vlákna			
Teplota vlákna [°C]	Peak C1 [nm]	Peak C2 [nm]	Vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 [pm]
90	1556,244	1556,633	389
110	1556,477	1556,875	398
130	1556,751	1557,242	491
150	1556,805	1557,372	567

Obr. 6.2.17: Hodnoty odrazu kolmé FBG mřížky v závislosti na teplotě vlákna

Měření odrazu v závislosti na teplotě vlákna prokázalo, že se zvyšující se teplotou téměř nedochází k posuvu špiček odrazového spektra k vyšším vlnovým délkám. U peaků C1 a C2 došlo k posuvu v rozmezí cca 0,5 – 0,7 nm. Z tabulky na obr. 6.2.17 je dobře patrná rostoucí vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 se vzrůstající teplotou, viz grafy na obr. 6.2.13 až 6.2.16. Při teplotě vlákna 90°C činí tato hodnota 389 pm, při teplotě vlákna 150°C již 567 pm.

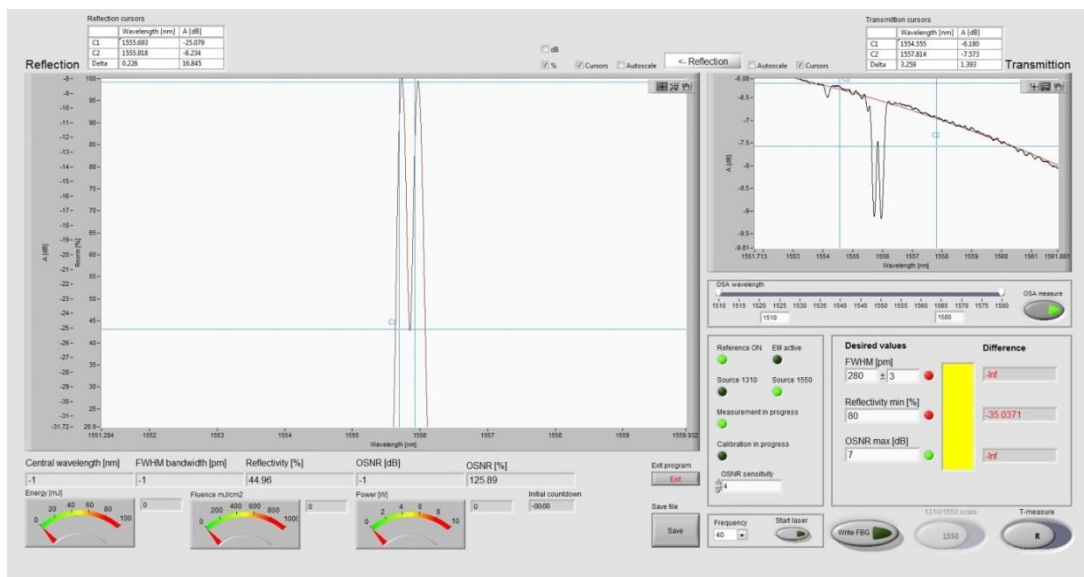
### 6.2.3 Vícenásobná kolmá a nakloněná FBG mřížka

Stejně jako u obou předchozích mřížek bylo k zápisu použito jednovidové optické vlákno. U vlákna byl proveden zápis kolmé a nakloněné struktury přes sebe. Vlákno bylo umístěno pod fázovou masku a vystaveno expozici UV laseru. Po záznamu první mřížky byla natočena fázová maska o  $1^\circ$  a vlákno vystaveno druhé expozici UV záření, viz obr. 6.2.18. Mřížky měly stejnou odrazivost a stejnou vlnovou délku. Po upnutí vlákna s mřížkou do tahového přípravku byla provedena série měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna. Oba konce vlákna byly zakončeny v optických rychlospojkách a připojeny k měřicí soustavě.



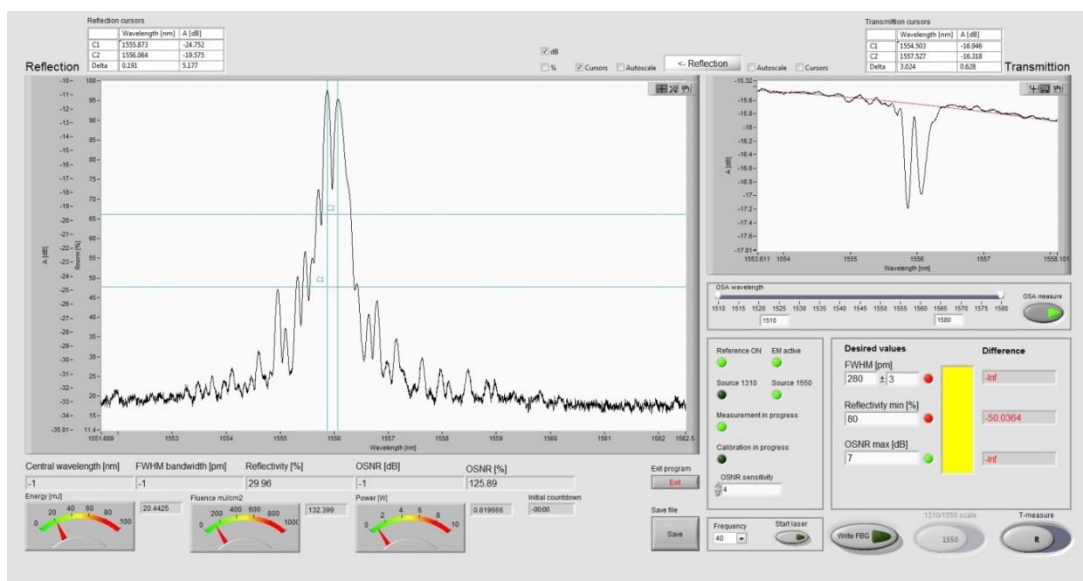
Obr. 6.2.18: : Princip zápisu kolmé a nakloněné mřížky přes sebe

Změřené špičky odrazového spektra nenapnutého vlákna vykazují téměř stejnou výšku, viz obr. 6.2.19



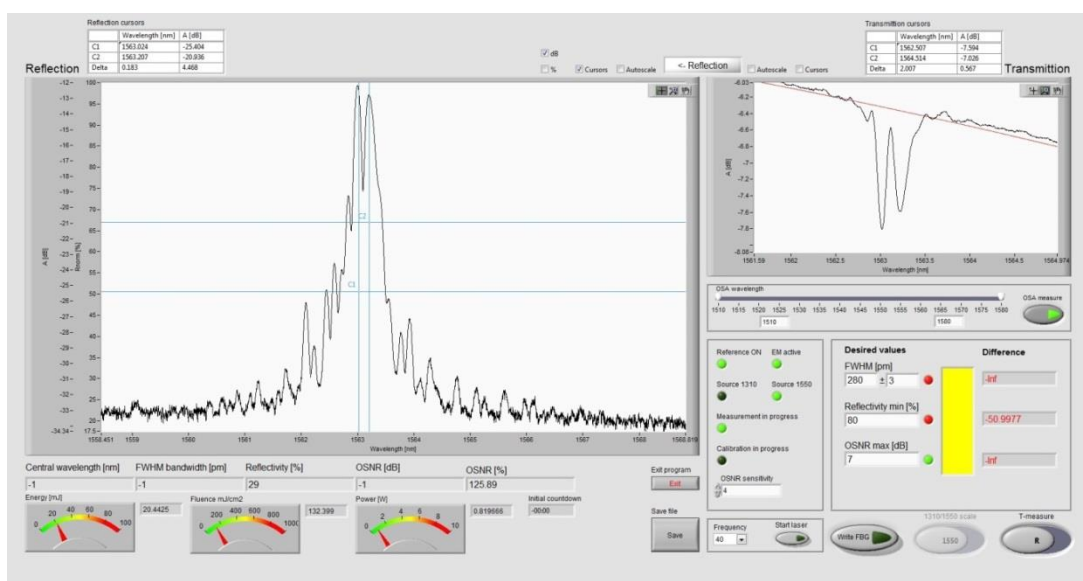
Obr. 6.2.19: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 0 N

Graf odrazového spektra vlákna napnutého silou 3 N, viz obr. 6.2.20



Obr. 6.2.20: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 3 N

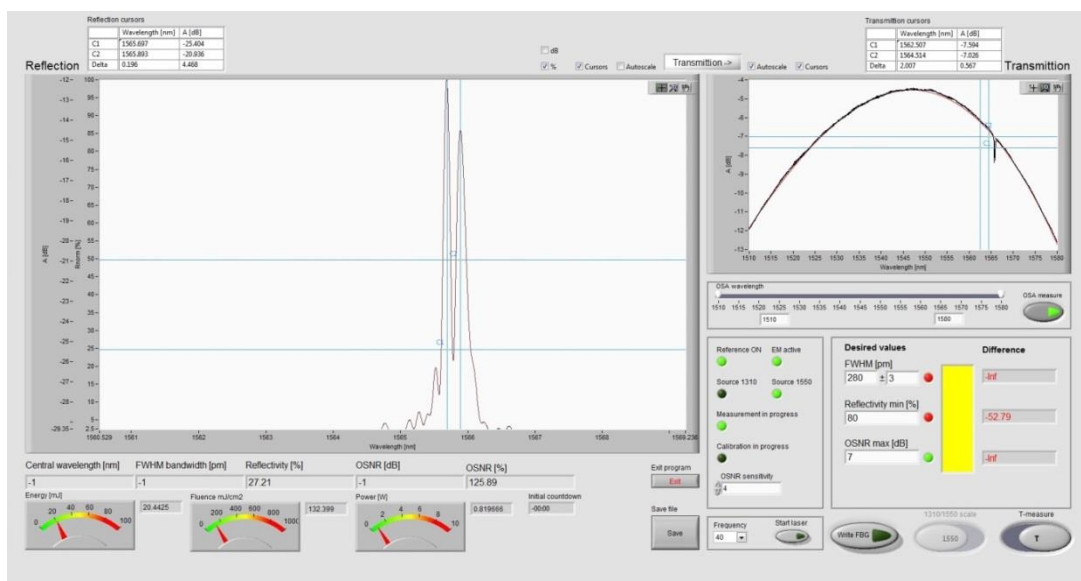
U vlákna napnutého silou 4 N je již patrný začínající posuv špiček odrazového spektra do oblasti vyšších vlnových délek, viz obr. 6.2.21



Obr. 6.2.21: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 4 N

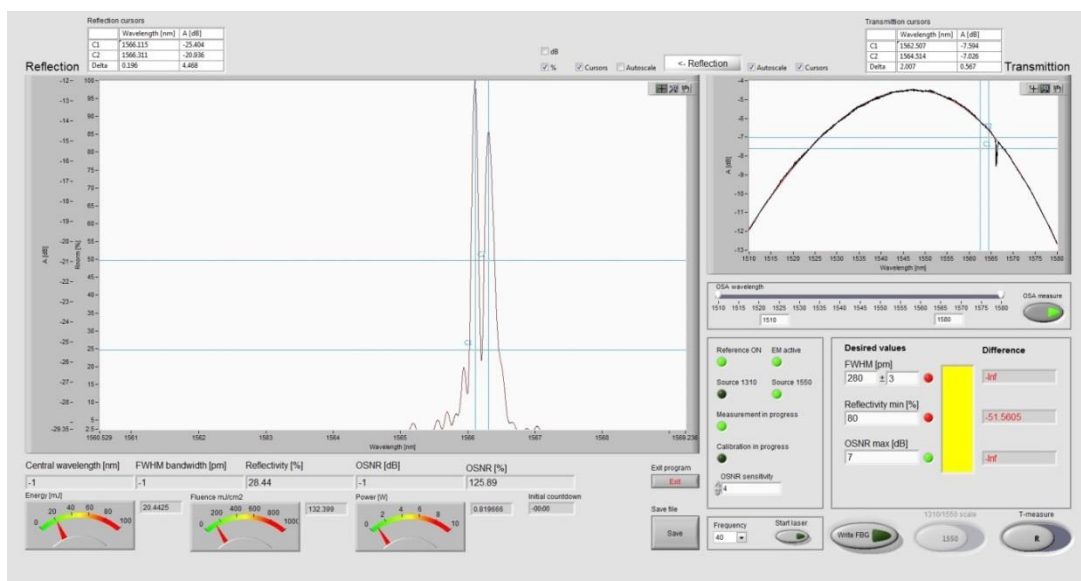


Změřená charakteristika odrazového spektra při napnutí vlákna silou 6 N, viz. obr. 6.2.22



Obr. 6.2.22: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 6 N

Graf špiček odrazového spektra při napnutí vlákna silou 7 N, viz. obr. 6.2.23.



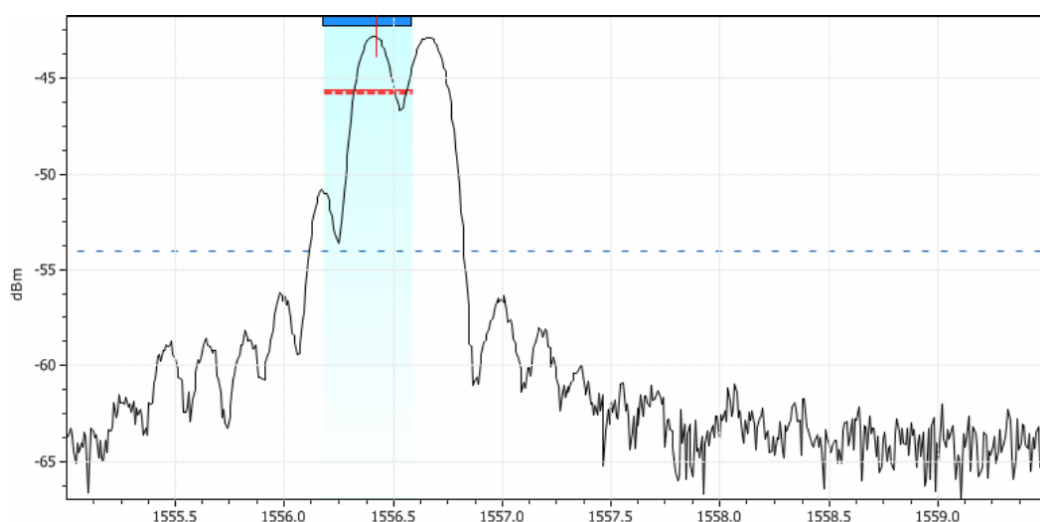
Obr. 6.2.23: Odrazové spektrum kolmé a nakloněné FBG mřížky napnuté silou 7 N

Vícenásobná kolmá a nakloněná FBG mřížka měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna			
Napnutí vlákna [N]	Peak C1 [nm]	Peak C2 [nm]	Vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 [pm]
0	1555,693	1555,918	226
3	1558,873	1559,064	191
4	1563,024	1563,207	183
5	1564,115	1564,311	196
6	1565,697	1565,893	196
7	1566,115	1566,311	196

Obr. 6.2.24: Hodnoty odrazu kolmé a nakloněné FBG mřížky v závislosti na napnutí vlákna

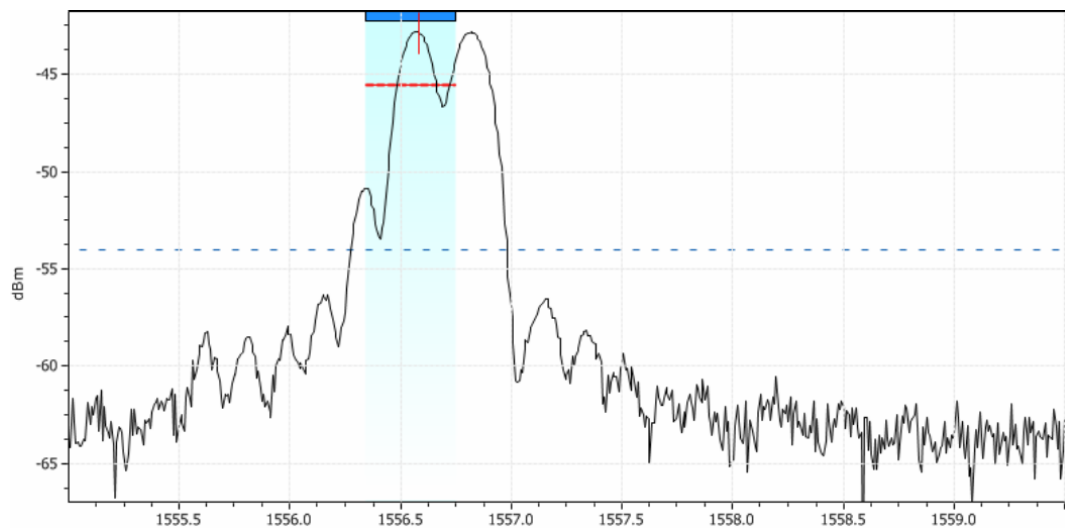
Jako u předchozího měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna došlo působením tahové síly na vlákno s mřížkou k posuvu špiček odrazového spektra do oblasti vyšších vlnových délek. Posuv špiček odrazového spektra C1 a C2 byl cca 9,5 nm, viz obr. 6.2.24. Rozdíly ve vzdálenostech mezi vrcholy peaků C1 a C2 byly zanedbatelné.

Měření odrazu vlákna s mřížkou v závislosti na teplotě, probíhalo stejným způsobem jako mřížky s kolmou strukturou. Měřené vlákno bylo po vložení do temperovací pece postupně temperováno na teplotu 90°C, 110°C, 130°C a 150°C, k analýze, zobrazení a uložení naměřených hodnot byl použit spektrální analyzátor EXFO FTB-500.

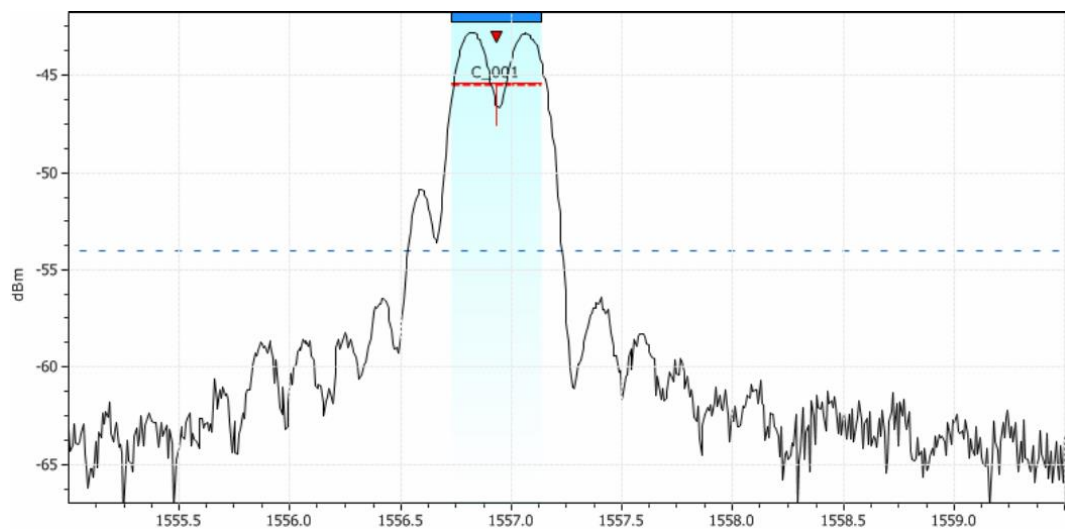


Obr. 6.2.25: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 90°C

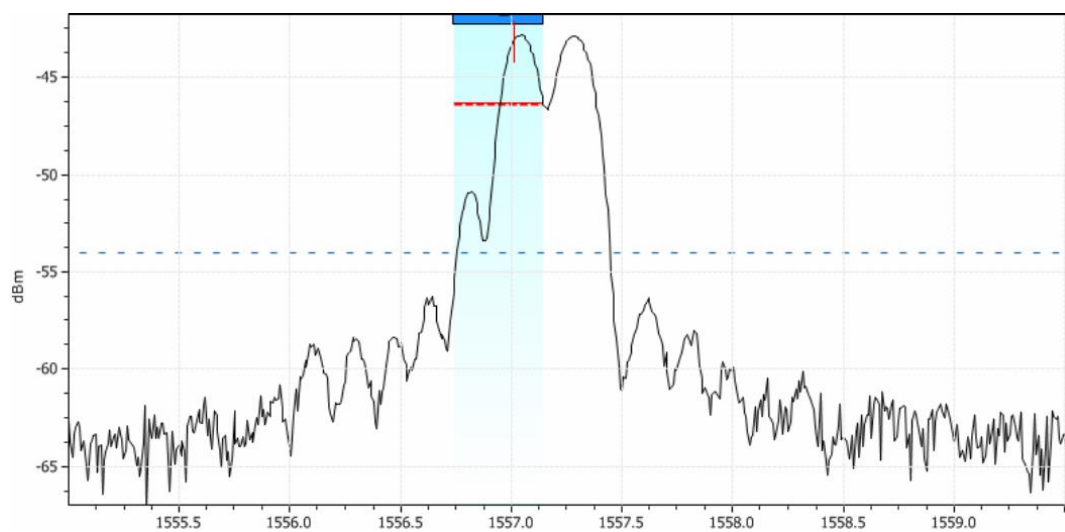




Obr. 6.2.26: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 110°C



Obr. 6.2.27: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 130°C



Obr. 6.2.28: Odraz kolmé a nakloněné FBG mřížky při teplotě vlákna 150°C

Vícenásobná kolmá a nakloněná FBG mřížka měření odrazu v závislosti na teplotě vlákna			
Teplota vlákna [°C]	Peak C1 [nm]	Peak C2 [nm]	Vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 [pm]
90	1556,422	1556,63	208
110	1556,583	1556,875	232
130	1556,812	1557,062	250
150	1557,014	1557,27	256

Obr. 6.2.29: Hodnoty odrazu kolmé a nakloněné FBG mřížky v závislosti na teplotě vlákna

Stejně jako v případě předchozího měření odrazu v závislosti na teplotě vlákna i u mřížky č. 6 bylo prokázáno, že zvyšující se teplota téměř nemá vliv na posuv špiček odrazového spektra k vyšším vlnovým délkám. Také zde došlo k posuvu peaků C1 a C2 přibližně o 0,6 nm. Rovněž je vidět rostoucí vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 se vzrůstající teplotou vlákna, viz tabulka na obr. 6.2.29. Zvětšující se vzdálenost mezi vrcholy peaků C1 a C2 je dobře patrná z grafů na obr. 6.2.25 až 6.2.28. Menší vzdálenost mezi vrcholy peaků oproti mřížce č. 5, je zřejmě způsobena rozdílnou geometrií struktury ve vlákne. U mřížky č. 6 se jedná o kombinaci kolmé a nakloněné struktury, u mřížky č. 5 se jedná o kombinaci dvou kolmých struktur zapsaných do vlákna. Při teplotě vlákna 90°C je rozdíl mezi vrcholy peaků 208 pm, při vzrůstu teploty vlákna na 150°C tato hodnota činí 256 pm.

#### 6.2.4 Aplikace vláknových senzorů s mřížkou

Optovláknové senzory s mřížkou lze rozdělit na senzory monitorující činnost, senzory sledovacích aplikací a hybridní senzory.

Senzory pro monitorování činnosti vyžadují střední stupeň citlivosti vůči měřené veličině a jsou využívány k monitorování napětí ve velkých strukturách (např. mosty, chladicí věže jaderné elektrárny, atd.) Dále jsou tyto senzory nasazovány ke sledování důležitých parametrů (tlak, teplota, vibrace atd.) v klíčových místech patřičného systému pro určení místa poruchy.

Senzory sledovacích aplikací vyžadují velmi vysokou citlivost a vysoké rozlišení. Tyto senzory jsou využívány pro měření velmi slabých signálů. Příkladem sledovacího senzoru může být optický vláknový hydrofon, který byl velmi obtížné realizovatelný kvůli vysokým požadavkům na rozlišení. Realizaci umožnil až příchod laserových vláknových senzorů s Braggovskou mřížkou.

Hybridní senzory využívají některé vlastnosti monitorovacích i sledovacích senzorů. Tyto vláknově optické ultrazvukové senzory disponují malými rozměry a schopností provozu v řádu MHz. Oblast jejich využití je v ultrazvukovém lékařském snímání v živém organismu nebo akustická emisní spektroskopie pro nedestruktivní vyhodnocení metalických a kompozitních struktur.

Provedená měření v diplomové práci analyzují a zkoumají kolmé a nakloněné struktury v optických vláknech a technologie výroby vícenásobných Braggových mřížek. Tyto vícenásobné struktury lze využít ke sledování různých fyzikálních a chemických veličin.

Výsledky měření závislosti odrazu na napnutí vlákna prokázaly, že působením tahové síly na vlákno s mřížkou docházelo k posuvu špiček odrazového spektra směrem k vyšším vlnovým délkám cca o 10 nm. Vzdálenost mezi vrcholy peaků zůstala přibližně stejná. Mezi možnou oblast nasazení těchto senzorů patří např. sledování stavu stavebních konstrukcí případně aplikace v železniční dopravě. Na železnici je možné vícenásobné FBG senzory umístit přímo na kolejnice. Po navaření dvou senzorů na sebe, dochází při průjezdu vlakové soupravy ke smršťování jednoho a současně k natahování druhého senzoru. Na základě této skutečnosti lze analyzovat průhyb kolejnic a se získaných údajů určit rychlost vlaku, směr pohybu vlakové soupravy nebo deformaci kolejnic.

Měření závislosti odrazu na teplotě vlákna prokázalo, že se zvyšující se teplotou dochází ke zvětšování vzdálenosti mezi vrcholy peaků. Posuv spektra do oblastí vyšších vlnových délek je zanedbatelný. Mezi možné aplikační nasazení těchto senzorů patří např. sledování teploty vinutí transformátorů. Informace o teplotě vinutí je velmi důležitá, neboť životnost transformátoru je úměrná mechanické pevnosti izolace. Tuto pevnost ovlivňuje teplota, které je dlouhodobě vystavena. Zvýšení teploty izolace o pouhých 7°C zkrátí její životnost na polovinu. S vyšším zatížením transformátoru roste i teplota vinutí, a dochází ke zkrácení životnosti celého transformátoru.

## 7 ZÁVĚR

V této diplomové práci byly analyzovány jednotlivé typy konstrukcí bodových optických senzorů, jejich vhodnost pro využití a implementaci v průmyslu. Výsledek této analýzy vyústil do návrhu bodového optovláknového senzoru s podélnou strukturou a možnosti jeho průmyslového využití. Podstatná část práce je věnována vícenásobným Braggovým mřížkám které skrývají značný potenciál při využití v sensorice.

Úvod práce je věnován krátké historii optických vláken a cíli diplomové práce. V prvním kapitole jsou popsány základní definice světla a principy jeho šíření. Velká část této kapitoly se zabývá základním rozdělením optických vláken jak z hlediska konstrukce jádra, tak podle způsobu využití i jejich charakteristikami jako disperze, absorpce, útlum, nebo rozptyl. V práci jsou analyzovány základní typy optických vláknových senzorů a principy jejich činnosti, doplněné schematickými obrázky. Prostor je zde věnován optickým bodovým senzorům a vhodnosti jejich využití v průmyslu. Přestože existuje mnoho typů a způsobů členění optovláknových senzorů, byla zvýšená pozornost věnována senzorům souvisejícím se zadáním diplomové práce. Výsledek této analýzy vyústil do návrhu bodového optovláknového senzoru s podélnou strukturou a možností jeho průmyslového využití. Velmi perspektivní se jeví mřížkové optické senzory. Značná část je věnována analýze Braggových mřížek ve vláknech a technologii jejich výroby v návaznosti na vícenásobné Braggovy mřížky. Tyto mřížky jsou tvořeny kolmými nebo podélnými strukturami v optických vláknech. Jednotlivé typy struktur jsou do optického vlákna zapsány prostřednictvím UV laseru přes fázovou masku. Před vlastním zápisem struktury do vlákna je nutné zvýšit fotosenzitivitu vlákna metodou hydrogenace. Metodou postupné expozice přes fázovou masku byly vytvořeny různé typy vícenásobných Braggových mřížek u kterých následně proběhlo experimentální měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna a teplotě. Součástí každého měření bylo i přehledné shrnutí naměřených hodnot do tabulky. Jako největší problém se nakonec ukázalo měření odrazu v závislosti na napnutí vlákna, při kterém hrozilo zničení vzorků dříve, než proběhne měření odrazu v závislosti na teplotě. Příčinou bylo zbavení optického vlákna jeho primární ochrany, čímž enormně klesla jeho mechanická pevnost. Obnažené vlákno ztrácí okolo 80% své tahové pevnosti. V současnosti je možné vyrobit Braggovu mřížku i bez odstranění primární ochrany metodou Cold-writing. Mřížka může být exponována přímo přes plastový obal, neboť standardně užívané obaly jsou pro vlnové délky blízko UV laseru průhledné. Tato metoda umožňuje zachování mechanické pevnosti vlákna. Z výsledků měření rovněž vyplývá, že odraz vícenásobné Braggovy mřížky v závislosti na teplotě zřejmě ovlivňuje i způsob zápisu struktury. U vícenásobné mřížky vytvořené kombinací kolmé a nakloněné struktury, byla vzdálenost mezi vrcholy peaků menší než u vícenásobné mřížky vytvořené kombinací dvou kolmých struktur zapsaných do vlákna. Tato skutečnost byla zřejmě způsobena rozdílnou geometrií struktury ve vláknech. Jako nejperspektivnější se jeví využití vícenásobné mřížky vytvořené postupnou expozicí přes fázovou masku kombinací kolmé a nakloněné struktury. Vznik moaré struktury prostřednictvím horkého vzduchu je víceméně náhodný jev a struktury nejsou tak dokonalé. Na základě výsledků měření vláknových senzorů s Braggovou mřížkou je navrženo možné konkrétní využití těchto senzorů v průmyslu.

# LITERATURA

- [1] FILKA, M. *Optické sítě*. VUTIUM. Brno 2007
- [2] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [3] Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Editor Eric Udd, William B Spillman. Hoboken: Wiley, c2011, xiii, 498 s. ISBN 978-0-470-12684-4
- [4] BORN, M., WOLF, E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th exp. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, xxxiii, 952 s. ISBN 05-216-4222-1.
- [5] ŠIŠKA, P., HANÁČEK, F. *Nekomunikační aplikace optických vláken*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Učební texty k předmětu Nekomunikační aplikace optických vláken, 80 s.
- [6] URBAN, F. *Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2012. 54 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [7] URBAN, F. *Braggovy mřížky v optických vláknech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2014. 54 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [8] FALEŠNÍK, V. *Podélné struktury v optických vláknech s využitím v senzorce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2015. 46 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. František Urban.
- [9] HELÁN, R. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. Brno: FEKT VUT BRNO, 2009.
- [10] OTHONOS, A., KALILI, K. *Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and applications*, Notwood, Artech House, 1999. ISBN 0-89006-344-4
- [11] KROHN, D. A.: *Fiber Optic Sensors - Fundamentals and Applications*. Instrument Society of America (1992), ISBN 0-55617-010-6
- [12] Wikipedia, free encyclopedia. *Elektromagnetické spektrum* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9\\_spektrum](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum)
- [13] FRANCOVÁ, A. *Zákon odrazu světla, Zobrazení na rovinném zrcadle* [online]. [cit. 2016-05-24]. Elektronická prezentace. 2012. Dostupné z: [http://www.zs-mat5.cz/vyuka/images/fyzika/zakon\\_odrazu\\_1.jpg](http://www.zs-mat5.cz/vyuka/images/fyzika/zakon_odrazu_1.jpg)
- [14] Fyzika pro život. *Učebnice fyziky*. [online] ]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://fyzika.fyzikaprozivot.cz/7-rocnik/5-2-odraz-a-lom-svetla>
- [15] CHALUPSKÝ, Z. *Fyzika*. [online] ]. [cit. 2016-05-24]. Elektronická prezentace. 2012. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3067774/#>

[16] HOLUB, P. *Lambda služby*. Brno: Zpravodaj ÚVT MU. ISSN 1212-0901, 2004, roč. XV, č. 2, 6 s. Odborný článek.

Dostupné z: <http://webserver.ics.muni.cz/bulletin/articles/316.html>

[17] Wikipedia, free encyclopedia. *Optické vlákno* [online]. [cit. 2016-05-24].

Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno)

[18] BUBNÍK, L., KLAJBL, J., MAZUCH, P. *Optoelektrotechnika*. Brno: Střední škola informatiky, poštovníctví a finančnictví Brno. Elektronické učební texty, 20 s. ISBN 978-80-88058-20-5.

Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Impresum.html>

[19] DVOŘÁK, M. *Optické senzory*. [online]. [cit. 2016-05-24]. Odborný článek, 31 s.

Dostupné z: [http://www.kompozity.info/clanky/optik\\_ten/opticke\\_senzory.pdf](http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf)

[20] GOLUBEV, M. Program pro výpočet rozložení optické intenzity. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014

[21] KYSELÁK, M. Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2009. 26 s. Disertační práce. Vedoucí práce: Doc. Ing. Miloslav Filka, CSc. ISBN 978-80-214-3827-9.

[22] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Mikrokom, Praha 2001.

[23] OLEČEK, J. Optoelektronika a optoelektronické prvky. BEN Praha 2005, ISBN 80-7300-184-5

[24] GALLO, M. Optické vláknové senzory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2013. 84 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing Petr Münster.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

[SI] Step Index, skoková změna indexu lomu

[GI] Gradient index, postupná změna indexu

[POF] Polymer Optical Fiber, plastové optické vlákno

[NA] Numerická apertura

[PMD] Polarization Mode Dispersion, polarizační disperze

[Fe] Ferrum, železo

[Cu] Cuprum, měď

[Cr] Chromium, chrom

[DTS] Distributed Temperature Sensing, distribuované snímání teploty

[DTSS] Distributed Temperature and Strain Sensing, distribuované snímání teploty a tlaku

[DAS] Distributed Acoustic Sensing, distribuované snímání zvuku

[OTDR] Optical Time Domain Reflectometry, optická reflektometrie

[FBG] Fiber Bragg grating, optická Braggova mřížka

[Tilted FBG] Tilted Fiber Bragg grating, nakloněná optická Braggova mřížka

[UV laser] Ultra Violet laser, ultrafialový laser